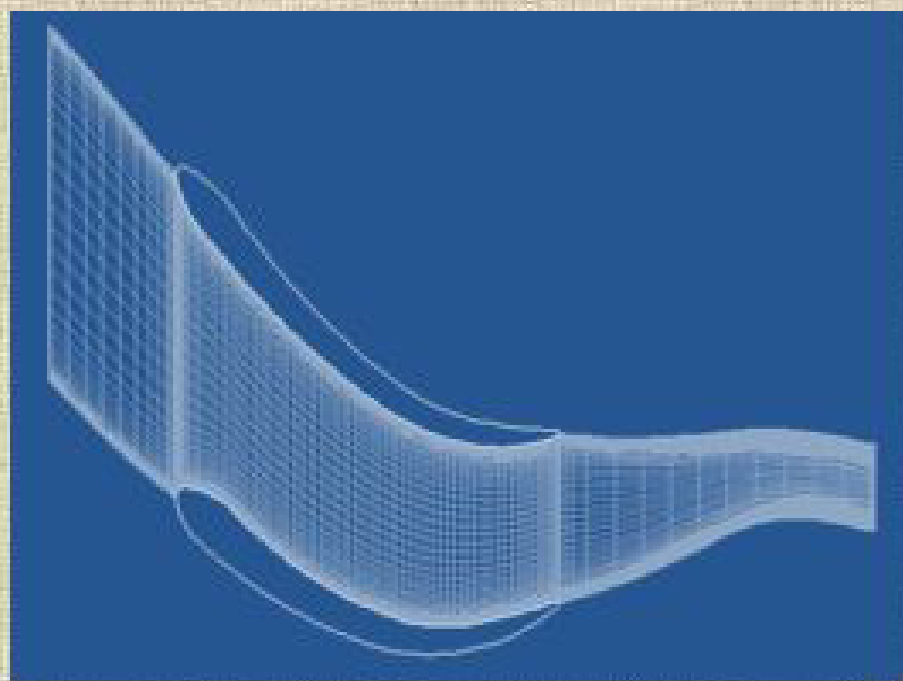


**КАЛІНКЕВИЧ М.В., КАЛАШНІКОВ А.М.**

**ЗВОРОТНІ НАПРЯМНІ АПАРАТИ  
ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРІВ**



**М.В. Калінкевич, А.М. Калашніков**

**ЗВОРОТНІ  
НАПРЯМНІ АПАРАТИ  
ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРІВ**

Навчальний посібник

*Рекомендовано вченою радою  
факультету технічних систем та енергоєфективних  
технологій*

Суми  
«Видавництво СумДУ»  
2010

УДК 621.515:533.6

К 17

Рецензенти:

*В.Б. Тарельник* - доктор технічних наук, професор Сумського національного аграрного університету

*О.Р. Якуба* - доктор технічних наук, професор Сумського національного аграрного університету

*Рекомендовано вченою радою  
факультету технічних систем та енергоєфективних  
технологій*

*(протокол № 8 від 26.05.2010 р.)*

**Калінкевич М.В.**

К 17 Зворотні напрямні апарати відцентрових компресорів:  
навчальний посібник / М.В. Калінкевич,  
А.М. Калашніков – Суми: Видавництво СумДУ,  
2010. – 128 с.

Посібник призначений для вивчення студентами методів розрахунку течії рідини та проектування зворотних напрямних апаратів відцентрових компресорів.

У посібнику розглянуті різні типи зворотних напрямних апаратів, показані деякі результати розрахунку течії газу у зворотних напрямних апаратах за допомогою сучасних комп'ютерних комплексів.

Наведена послідовність проектувального розрахунку зворотного напрямного апарата. Виконаний детальний опис комп'ютерної програми для проектувального розрахунку зворотного напрямного апарата і наведена інструкція для роботи з цією програмою.

Для студентів вищих навчальних закладів освіти III-IV рівнів акредитації напрямів підготовки «Енергомашинобудування», «Енергетика», «Механіка».

**УДК 621.515:533.6**

© Калінкевич М.В.,  
Калашніков А.М., 2010

## ЗМІСТ

	С.
УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ .....	5
ВСТУП .....	9
1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ ...	12
Питання для самоконтролю .....	25
2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТАХ .....	26
2.1 Розрахунок параметрів потоку за допомогою ANSYS .....	28
2.2 Розрахунок параметрів потоку за допомогою FlowVision .....	32
2.3 Розрахунок параметрів потоку за допомогою комплексу програм FlowRC .....	35
Питання для самоконтролю .....	46
3 ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА .....	47
3.1 Вихідні дані .....	47
3.2 Послідовність розрахунку .....	49
3.3 Профілювання лопаток зворотного напрямного апарата .....	55
Питання для самоконтролю .....	57
4 ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ РОБОТИ З ПРОГРАМОЮ <i>CalcRetC.exe</i> .....	59
Питання для самоконтролю .....	67
5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА .....	68
5.1 Призначення і умови роботи зворотного напрямного апарата .....	68
5.2 Конструктивні особливості зворотних напрямних апаратів .....	69
5.3 Монтаж елементів зворотних напрямних апаратів .....	78

5.3.1 З'єднання внутрішнього диска з діафрагмою..	88
5.3.2 Складання зворотного напрямного апарата...	90
5.3.3 Лабіринтові ущільнення .....	96
5.4 Побудова проточної частини зворотного направного апарата.....	103
5.4.1 Побудова профілю лопатки .....	105
5.5 Вибір матеріалу та способу виготовлення заготовки .....	108
5.6 Вимоги до механічної обробки зворотного напрямного апарата .....	109
5.7 Виконання креслень ЗНА за допомогою CAD - технологій.....	110
Питання для самоконтролю .....	111
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	112
Додаток А. Порівняння результатів розрахунку па- раметрів потоку з експериментальними даними .....	114
Додаток Б. Приклад файлу результатів розрахунку зворотного напрямного апарата <i>RetC.rez</i> .....	118
Додаток В. Приклади креслень .....	119

## УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

$b$	– ширина характерних перерізів проточної частини в меридіональній площині; ширина трубки течії, $m$ ;
$D, d$	– діаметри характерних перерізів, $m$ ;
$r$	– радіус, $m$ ;
$R$	– радіус, $m$ ; – газова стала, $Dж/(кг \cdot K)$ ; – радіус кривизни, $m$ ;
$\alpha$	– кут потоку, град;
$\delta$	– товщина лопатки, $m$ ;
$\Delta$	– різниця параметрів;
$t$	– крок решітки, $m$ ;
$\rho$	– густина, $кг/м^3$ ;
$\varphi$	– полярний кут, $рад$ ;
$A, B, C, D$	– коефіцієнти ;
$c$	– швидкість, $m/c$ ; – питома теплоємність, $Dж/(кг \cdot K)$ ;
$\tau$	– час, $c$ ; коефіцієнт зменшення площі міжлопаткового каналу;
$X, Y, Z$	– проекції масових сил, $H$ ;
$p$	– тиск, $Па$ ;
$p^*$	– тиск адіабатично загальмованого потоку, $Па$ ;
$\mu$	– коефіцієнт динамічної в'язкості, $Па \cdot c$ ;
$x, y, z$ ; $z, r, u$	– осі координат;
$\vec{c}$	– вектор швидкості;
$n, s$	– криволінійні координати;
$\beta$	– кут, $рад$ ;
$\gamma$	– кут, $рад$ ;

$f$	– функція; площа поверхні, $m^2$ ; коефіцієнт; формпараметр;
$a_0, \dot{a}_1, \dot{a}_2$	– коефіцієнти;
$H, L$	– коефіцієнти;
$m$	– маса, $кг$ ;
$M$	– момент імпульсу, $Дж \cdot c$ ;
$v$	– питомий об'єм, $m^3/кг$ ;
$n$	– показник політропи;
$i$	– питома ентальпія, $Дж/кг$ ;
$i^*$	– питома ентальпія адіабатично загальмованого потоку, $Дж/кг$ ;
$q$	– питома теплота, $Дж/кг$ ;
$z$	– коефіцієнт стисливості; – кількість лопаток;
$T$	– температура, $К$ ;
$\bar{m}$	– масова витрата, $кг/c$ ;
$\lambda$	– коефіцієнт швидкості (відносна швидкість);
$\pi(\lambda), \varepsilon(\lambda), \tau(\lambda)$	– газодинамічні функції;
$a_{кр}$	– критична швидкість, $м/c$ ;
$\Delta n$	– відрізок нормалі;
$k$	– коефіцієнт; показник адіабати;
$Re$	– число Рейнольдса;
$l$	– довжина, $м$ ;
$\delta^*$	– товщина витиснення, $м$ ;
$\delta^{**}$	– товщина втрати імпульсу, $м$ ;
$\nu$	– коефіцієнт кінематичної в'язкості, $m^2/c$ ;
$\bar{L}$	– густина решітки; відносна довжина;

$\sigma$	– газодинамічна функція;
$\eta$	– коефіцієнт корисної дії;
$\Phi$	– умовний коефіцієнт витрати;
$F$	– функція; площа, $m^2$ ;
$\zeta$	– коефіцієнт втрат.

### Індекси

0,1,2,3,4,5,6	– позначення характерних перерізів;
<i>л</i>	– лопатковий;
<i>пк</i>	– поворотне коліно;
<i>к</i>	– кільцевий;
<i>i</i>	– <i>i</i> -а координата;
<i>x, y, z</i>	– проекції на осі;
<i>p</i>	– при сталому тиску;
<i>m</i>	– у проекції на меридіональну площину;
<i>u</i>	– у проекції на вісь <i>u</i> ;
<i>r</i>	– у проекції на вісь <i>r</i> ;
<i>n</i>	– політропний;
<i>вн</i>	– внутрішній;
<i>зов</i>	– зовнішній;
<i>кр</i>	– критичний;
<i>вх</i>	– параметр на вході;
<i>ув</i>	– увігнутий;
<i>оп</i>	– опуклий;
$\Sigma$	– сумарний;
<i>d</i>	– дифузійний;
<i>опт</i>	– оптимальний;
<i>F</i>	– площа;
<i>j</i>	– <i>j</i> -а координата;
<i>сер</i>	– середнє значення параметра;
<i>від</i>	– відносний.



<i>id</i>	– ідеальний;
<i>вт</i>	– втулковий;
<i>пер</i>	– периферійний;
<i>min</i>	– мінімальний;
<i>max</i>	– максимальний.

### **Скорочення**

ЗНА	– зворотний напрямний апарат;
ККД	– коефіцієнт корисної дії;
ПК	– поворотне коліно;
РК	– робоче колесо;
ЛД	– лопатковий дифузор;
БЛД	– безлопатковий дифузор.

## ВСТУП

Відцентрові компресори є найпоширенішим типом компресорів динамічної дії. Вони використовуються в багатьох галузях промисловості. Підвищення ефективності відцентрових компресорних машин завжди було актуальним завданням і наразі продовжує залишатися ним. Розвиток існуючих технологічних процесів і створення нових приводять до необхідності постійної модернізації відцентрових компресорів. Компресори, які застосовуються у газовій, нафтовій та хімічній галузях промисловості, у холодильних установках, мають більшу одиничну потужність (десятки МВт), а загальна потужність машин становить мільйони кіловатів.

Велика енергоємність робочого процесу відцентрових компресорів висуває високі вимоги до їх ККД. Усі основні показники відцентрових компресорів пов'язані з формою та розмірами проточної частини.

Проміжний ступінь відцентрового компресора, крім робочого колеса і дифузора, містить зворотний напрямний апарат. Зворотні напрямні апарати (ЗНА) призначені для підведення газу з дифузора попереднього ступеня до робочого колеса наступного ступеня.

При течії газу у ЗНА істотно змінюється напрямок його руху: на  $(3/4)\pi$  - у меридіональній площині і приблизно на  $(1/6)\pi$  - у радіальній. Внаслідок цього структура потоку має складний просторовий характер [1, 2, 3].

Як показують дослідження відцентрових компресорів, більше половини енергії, що перетворюється в тепло у процесі стиснення і переміщення газу, припадає на нерухомі елементи ступеня. У середньому відповідно до досліджень [1] на оптимальному режимі роботи компресора у ЗНА втрачається близько 5% від усієї механічної енергії

ротора компресора. При цьому на долю поворотного коліна припадає приблизно 40% від всіх втрат у ЗНА, а інші 60% - припадає на долю лопаткових решіток і вихідного каналу. Мінімальні значення коефіцієнтів втрат ЗНА у чотири - шість разів більші, ніж у дифузорів, тому можна розраховувати на підвищення ККД відцентрових компресорів за рахунок удосконалення ЗНА.

Складність фізичних процесів, що відбуваються в турбомашинах, потребує комплексного підходу до вирішення поставлених завдань. Разом із використанням програмних комплексів ANSYS CFX, Flow Vision та ін. для розрахунку течії газу у каналах турбомашин залишаються актуальними інженерні методи поелементного газодинамічного проектування.

Метою проектування зворотного напрямного апарата є розроблення технологічної конструкції апарата з високими газодинамічними показниками. Кінцевим результатом проектування ЗНА є креслення апарата у складальному стані, а також креслення деталей апарата. Для досягнення цього необхідно розв'язувати задачі, пов'язані з розрахунками параметрів потоку газу, визначенням геометричних параметрів, конструюванням апарата та його деталей, забезпеченням технологічності виготовлення.

У посібнику розглянуті різні типи зворотних напрямних апаратів, показані деякі результати розрахунку течії газу у зворотних напрямних апаратах за допомогою сучасних комп'ютерних комплексів. Наведена послідовність проектувального розрахунку зворотного напрямного апарата. Виконаний детальний опис комп'ютерної програми для проектувального розрахунку ЗНА і наведена інструкція для роботи з цією програмою.

Важливою частиною посібника є пояснення до конструювання зворотного напрямного апарата. На жаль, формат посібника не дає можливості виконати креслення бі-

льших розмірів, і тому деякі фрагменти конструкції, позначення і написи недостатньо розрізняються.

Під час виконання дипломних та курсових проектів можна скористатися електронними версіями креслень.

## 1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ

За конструктивним виконанням розрізняють каналні і лопаткові зворотні напрямні апарати.

Канальні ЗНА застосовуються винятково разом із каналними дифузорами (рис. 1.1 і 1.2).

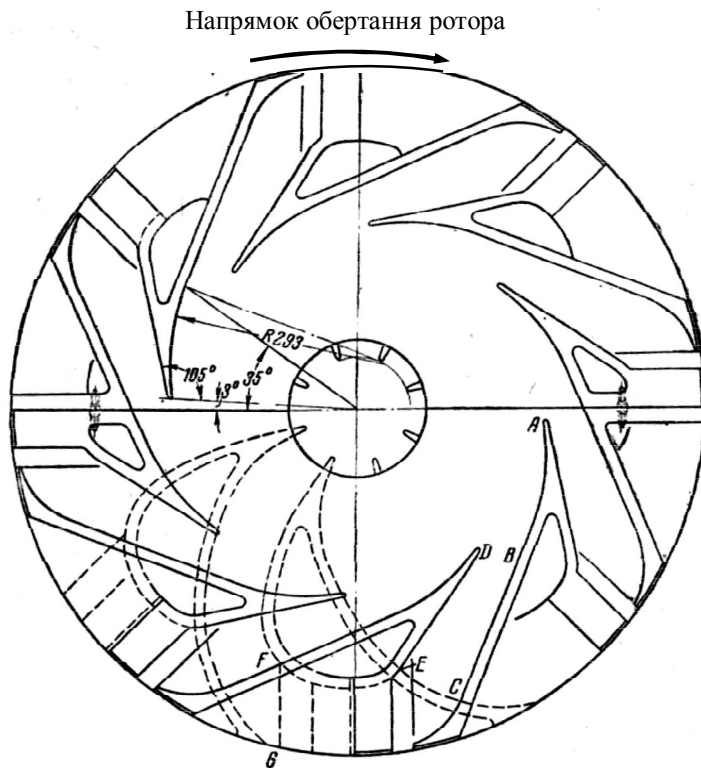


Рисунок 1.1 – Схема дифузора каналного типу

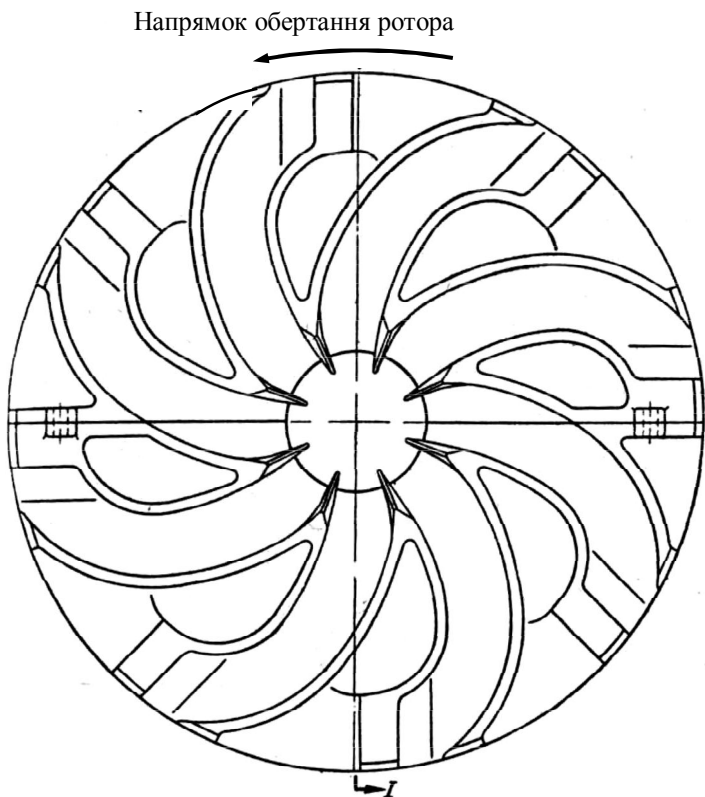


Рисунок 1.2 – Схема зворотного напрямного апарата каналного типу

Кількість каналів зворотного напрямного апарата відповідає кількості каналів дифузора.

Наведений на рисунку 1.1 каналний дифузор містить вісім каналів [3]. Вхідна ділянка дифузора має форму, близьку до логарифмічної спіралі (AB на рис. 1.1). Основна ділянка дифузора (від перетину BD до перетину

СЕ) має прямолінійні стінки. Від перетину СЕ до перетину FG відбувається поворот потоку одночасно у двох площинах (по гвинтовій лінії). Ця ділянка є перехідною між каналами дифузора і каналами зворотного напрямного апарата. Канали зворотного напрямного апарата є продовженням каналів дифузора (рис. 1.2).

Канальні дифузори і канальні ЗНА застосовуються у компресорах нечасто. Як правило, у компресорах застосовуються лопаткові зворотні напрямні апарати.

Лопатковий ЗНА містить три елементи: поворотне коліно (ПК); кругову лопаткову решітку і кільцеве коліно (рис. 1.3). Поворотне коліно обмежене циліндричними перерізами 4–4 і 5–5, лопаткова решітка обмежена циліндричними перерізами 5–5 і 6–6, кільцеве коліно обмежене циліндричним перерізом 6–6 і кільцевим перерізом  $0'–0'$ .

Основні параметри, що обумовлюють геометрію ЗНА, зазначені на рисунку 1.3. На вході у поворотне коліно - це ширина  $b_4$  і діаметр  $D_4$ , на виході з поворотного коліна - це  $b_5$  і  $D_5$ . Для поворотного коліна визначаються  $r_{нк}$  і  $R_{нк}$ . На виході з лопаткової решітки визначаються ширина каналу  $b_6$  і діаметр  $D_6$ . Вихідне коліно має розміри  $r_k$  і  $R_k$ .

Розміри на виході зі зворотного напрямного апарата (діаметри  $D_0$  і  $d_0$ ) дорівнюють розмірам на вході у робоче колесо наступного ступеня і визначаються при розрахунку робочих коліс.

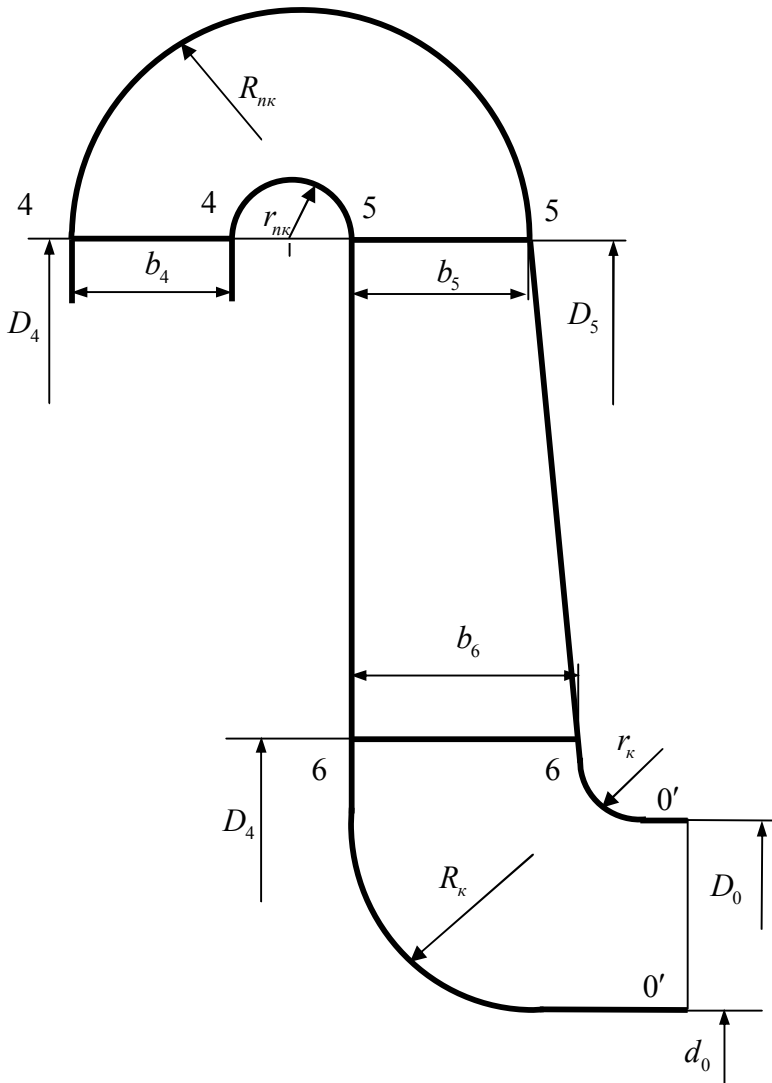


Рисунок 1.3 – Меридіональний контур зворотного напрямного апарата



## 1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ

---

Зовнішній вигляд лопаткового ЗНА показаний на рисунку 1.4.

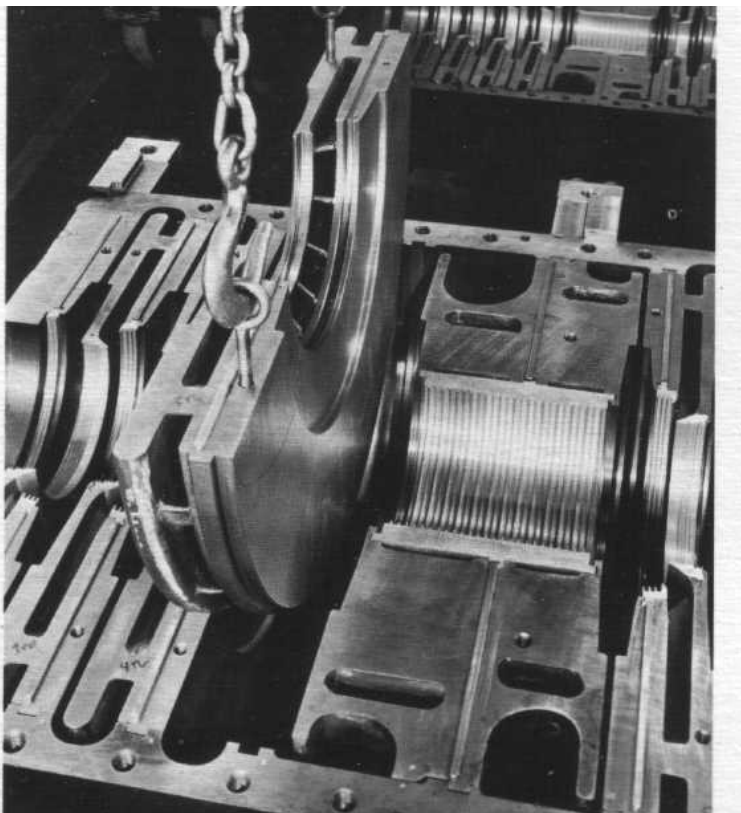


Рисунок 1.4 - Зовнішній вигляд зворотного напрямного апарата

Зворотні напрямні апарати можуть виконуватися з різною геометричною формою поворотного коліна і лопаткових решіток.

## 1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ

На рисунку 1.5 наведені поворотні коліна, втулковий і периферійний контур яких виконаний за дугою кола.

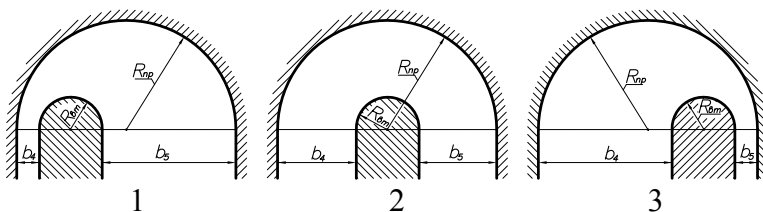


Рисунок 1.5 - Схеми поворотних колін ЗНА:  
 $1 - b_5 / b_4 > 1$ ;  $2 - b_5 / b_4 = 1$ ;  $3 - b_5 / b_4 < 1$

На рисунку 1.5:  $b_4$  – ширина на вході в ПК;  $b_5$  – ширина на виході з ПК;  $R_{вт}$  – радіус втулкової поверхні ПК;  $R_{пер}$  – радіус периферійної поверхні ПК.

Вибір значень  $b_5 / b_4$  виконується залежно від типу дифузора, значення коефіцієнта витрати, значення швидкості потоку на вході у ЗНА.

Експериментальні дослідження ЗНА з різними значеннями  $b_5 / b_4$  показують можливість застосування ПК для зменшення швидкості потоку, тобто для використання ЗНА як дифузора.

Для маловитратних ступенів відцентрових компресорів з вузькими дифузорами застосовують ЗНА, у яких відношення  $b_5 / b_4$  є істотно більшим за 1. При збільшенні відношення  $b_5 / b_4 > 2$  спостерігається збільшення втрат у ЗНА. При зростанні  $b_5 / b_4$  від 2,5 до 4,0 збільшується зона зворотних течій на внутрішній стінці ПК. Так, при  $b_5 / b_4 = 2,5$  зона зворотної течії при малих і

середніх кутах потоку дорівнює 20%, а при  $b_5/b_4 = 4,0 - 40\%$  перерізу на всіх режимах течії.

Поворотні коліна, що значно розширюються, у яких втулковий і периферійний контури виконані за дугою кола, потрібно проектувати з роздільними ребрами (рис. 1.6).

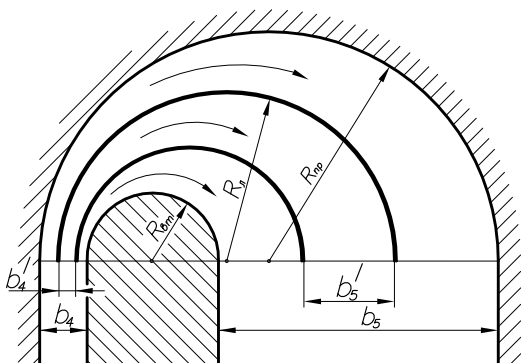


Рисунок 1.6 - Схема поворотного коліна з роздільними ребрами

Дослідження конструкцій ПК, що значно розширюються, показали, що при зміні геометричної форми поворотного коліна можуть застосовуватися безреберні ПК (рис. 1.7).

ЗНА з лопатками сталої товщини, середня лінія яких виконана за дугою кола (рис. 1.8), застосовуються у компресорах, що були спроектовані до 1970 р.

Дослідження впливу профілю лопаток на ефективність ЗНА показали, що проектування решіток з лопатками за двома або за трьома дугами кіл не приводить до поліпшення характеристик.

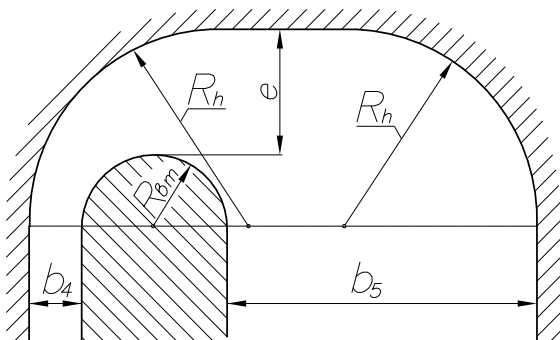


Рисунок 1.7 - Поворотне коліно ЗНА з периферійним контуром, виконаним не за дугою кола

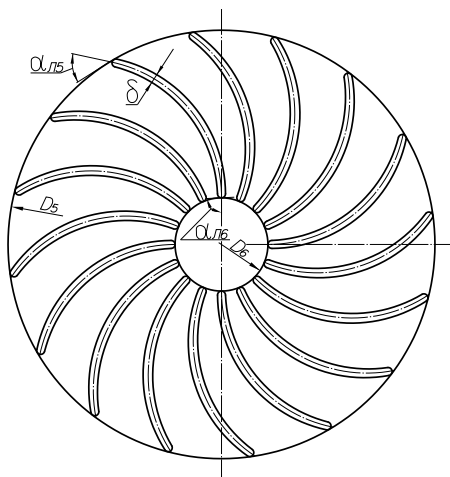


Рисунок 1.8 – Схема решітки ЗНА з лопатками сталюї товщини

Лопаткові решітки ЗНА з лопатками, середня лінія яких виконана за дугою кола, мають загальні недоліки. На

## 1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ

увігнутих поверхнях лопаток можуть виникнути значні дифузорні течії газу, які призводять до відриву потоку і збільшення втрат енергії у ЗНА. Відрив потоку є також характерним і для лопаток, середня лінія яких проектується за кількома радіусами.

Одним із способів поліпшення структури потоку у ЗНА є використання дворядних лопаткових решіток (рис. 1.9).

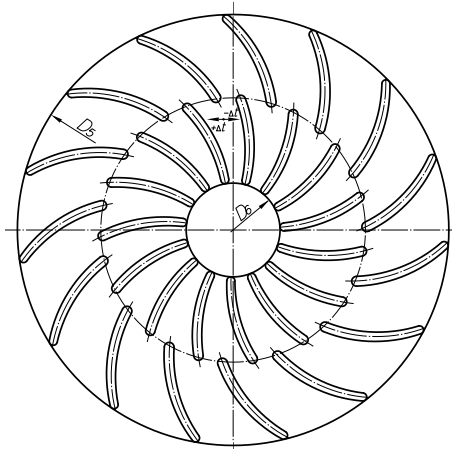


Рисунок 1.9 - Схема дворядної лопаткової решітки

Оптимальним зсувом другого ряду відносно першого є варіант  $\Delta t = 0,25 \cdot t$ , тобто зсув лопаток другого ряду до увігнутої сторони лопаток першого ряду. При такому зсуві забезпечується більш рівномірний розподіл навантаження між рядами лопаток і поліпшується обтікання лопаток другого ряду (відрив потоку зміщується до виходу з каналу, що приводить до зменшення втрат змішання у кільцевому каналі).

## 1 ТИПИ ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТІВ

Наразі у відцентрових компресорах не використовуються ЗНА з лопатками сталої товщини, оскільки їх ефективність є більш низькою порівняно із ЗНА, у яких лопатки мають змінну товщину (рис. 1.10).

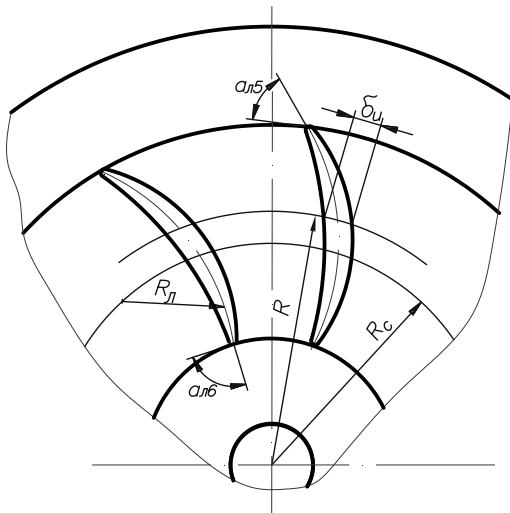


Рисунок 1.10 - Схема лопаткової решітки із профільованими лопатками

Як і для лопаток зі сталою товщиною, середня лінія профільованих лопаток, тобто лопаток зі змінною товщиною, як правило, виконується за дугою кола.

Лопатки, спроектовані за лінійним законом зміни площі міжлопаткових каналів [5] (що при  $\rho = const$  те саме, що і лінійна зміна середньовитратної швидкості), мають стовщення у середній частині і стають більш масивними (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 - Зовнішній вигляд лопаткових решіток ЗНА із профільованими лопатками

Застосовуються і такі методики профілювання лопаткових решіток:

- лопатки, спрофільовані за умовою забезпечення приблизно постійного градієнта швидкостей уздовж опуклої та увігнутої сторін. Це досягається за рахунок

проектування решітки з постійним навантаженням за довжиною лопатки;

- лопатки, спрофільовані за умовою забезпечення приблизно постійної швидкості уздовж опуклої поверхні.

Існує методика побудови лопаток ЗНА, яка, на думку авторів [6], позбавлена недоліків методу побудови профільованих лопаток за лінійним законом. Оскільки лопатки ЗНА мають складну геометрію (рисунок 1.12), визначити середню лінію лопатки довільної форми непросто.

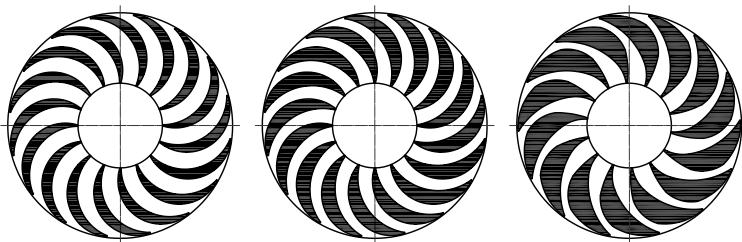


Рисунок 1.12 - Деякі види лопаток ЗНА тілесного профілю

Пропонується лінію профілю увігнутої поверхні лопатки визначати за допомогою диференціального рівняння

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{\arctg[\cos(Ar^2 + Br + C)]}, \quad (1.1)$$

де  $\varphi$  - полярний кут увігнутої сторони лопатки;  
 $r$  – поточний радіус.



Лінія профілю опуклої поверхні лопатки визначається з використанням двох сполучених сплайн-функцій у полярних координатах:

$$\varphi_i = A_i r_i^3 + B_i r_i^2 + C_i r_i + D_i, \quad (1.2)$$

де  $i$  – номер ділянки (сегмента).

Коефіцієнти  $A$ ,  $B$ ,  $C$  і параметр  $D$  підбирають так, щоб виключити наявність точок перегину в межах I сегмента; II сегмент сплайн-функції сполучається з I сегментом і вихідною кромкою профілю.

Із усіх вищенаведених методів побудови лопаткових решіток ЗНА найбільше поширення одержали методи побудови середньої лінії профілю лопатки ЗНА за дугою кола. Експериментально підтверджена більш висока ефективність ЗНА із профільованими лопатками, ніж з лопатками сталої товщини. Але відомо, що оптимальні розподіли швидкостей на лопатці не є лінійними, оскільки при стовщенні примежового шару градієнт швидкості для передвідривної течії має зменшуватися, що не відбувається на лопатках даної конструкції.

Більш ефективними є методи проектування, де задається розподіл швидкості на поверхні лопаток, що забезпечує безвідривну течію газу в дифузорних каналах. При такому проектуванні досягається істотне зниження напруги тертя на обтічних поверхнях. Реалізація даного підходу при проектуванні лопаткових решіток ЗНА має найбільші перспективи.

Становлять інтерес для подальшого, більш докладного вивчення дворядні решітки як найоптимальніші з погляду газодинаміки.

### Питання для самоконтролю

1. Призначення зворотних напрямних апаратів.
2. Типи зворотних напрямних апаратів.
3. Конструкція каналних зворотних напрямних апаратів.
4. Конструкція лопаткових зворотних напрямних апаратів.
5. Основні параметри, що обумовлюють геометрію лопаткових зворотних напрямних апаратів.
6. Геометричні форми поворотних колін ЗНА.
7. Типи лопаткових решіток ЗНА.
8. Недоліки лопаткових решіток ЗНА з лопатками, середня лінія яких виконана за дугою кола.
9. Які методики профілювання лопаткових решіток застосовуються при проектуванні зворотних напрямних апаратів?
10. Чому ефективність ЗНА із профільованими лопатками є більш високою, ніж у ЗНА з лопатками сталої товщини?
11. Які переваги мають дворядні лопаткові решітці у порівнянні з однорядними?

**2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В  
ЗВОРОТНИХ НАПРЯМНИХ АПАРАТАХ**

Останнім часом для розрахунків течії газу у відцентрових компресорах на машинобудівних підприємствах усе частіше застосовують програмні комплекси, які дозволяють визначати не тільки сумарні характеристики ступеня і його елементів, але і структуру потоку в проточній частині турбомашин. Як правило, дані програмні комплекси використовують складні моделі течії, у яких чисельно вирішується рівняння Нав'є-Стокса [7]:

$$\rho \cdot \frac{dc_x}{d\tau} = \rho \cdot X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \cdot \left( 2 \cdot \frac{\partial c_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \cdot \text{div} \vec{c} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_x}{\partial y} + \frac{\partial c_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_x}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial x} \right) \right],$$

$$\rho \cdot \frac{dc_y}{d\tau} = \rho \cdot Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \cdot \left( 2 \cdot \frac{\partial c_y}{\partial y} - \frac{2}{3} \cdot \text{div} \vec{c} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_y}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_x}{\partial y} + \frac{\partial c_y}{\partial x} \right) \right],$$

$$\rho \cdot \frac{dc_z}{d\tau} = \rho \cdot Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \cdot \left( 2 \cdot \frac{\partial c_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \cdot \text{div} \vec{c} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_x}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \cdot \left( \frac{\partial c_y}{\partial z} + \frac{\partial c_z}{\partial y} \right) \right].$$

У цих рівняннях  $X, Y, Z$  – проекції масових сил;  $p$  – статичний тиск;  $\rho$  – густина;  $c_x, c_y, c_z$  – проекції швидкостей;  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;

$\operatorname{div} \vec{c} = \frac{\partial c_x}{\partial x} + \frac{\partial c_y}{\partial y} + \frac{\partial c_z}{\partial z}$  – дивергенція вектора швидкості.

Як правило, при розрахунках використовується осереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса (англ. *RANS - Reynolds-averaged Navier-Stokes*).

Прикладні програми, такі, як ANSYS CFX, FlowVision та ін., дозволяють розв'язувати пряму задачу газодинаміки на високому інженерному рівні, але при проектних розрахунках для підбору оптимального варіанта необхідний значний час (кілька тижнів). У цих комплексах, як правило, застосовується модель ідеального газу для визначення термодинамічних параметрів потоку. Це може призводити до істотних похибок у визначенні густини, ентальпії, а отже, й інших параметрів потоку. Але завдяки візуалізації результатів розрахунку забезпечується гарне зображення якісної картини течії.

Нижче наведені приклади результатів розрахунків параметрів потоку у зворотних напрямних апаратах з використанням різних програмних комплексів. Приклади використання програмних продуктів ANSYS CFX і Flow Vision мають ілюстративний характер, тому пояснення до введення вихідних даних та стосовно особливостей використання цих програмних продуктів для розрахунку течії у ЗНА у посібнику не наводяться.

У посібнику докладно розглянуті методики розрахунку за допомогою програмного комплексу FlowRC і програми *CalcRetC*. Тексти програм наведені у додатках.

### 2.1 Розрахунок параметрів потоку за допомогою ANSYS

На рисунку 2.1 показаний розподіл тисків у зворотному напрямному апараті із профільованими лопатками, а на рисунку 2.2 - розподіл швидкостей. Розрахунки виконані з використанням програмного комплексу ANSYS CFX.

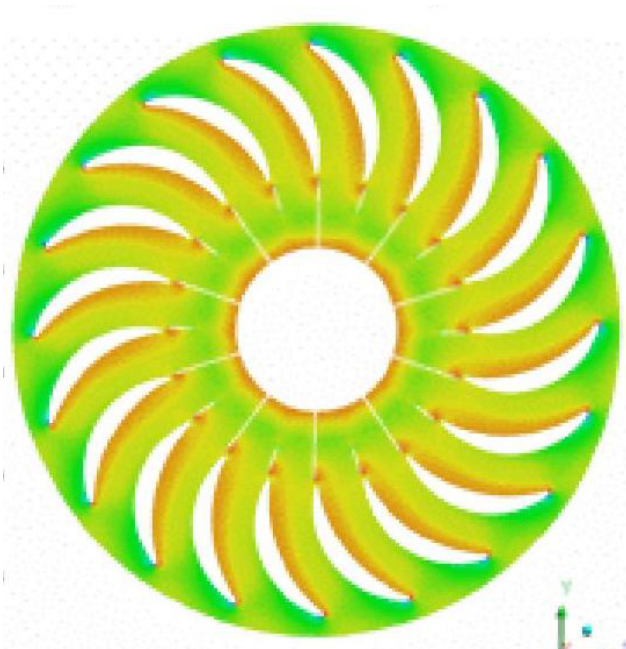


Рисунок 2.1 - Розподіл тисків у лопатковій решітці ЗНА (ANSYS CFX)

Для виконання розрахунків параметрів потоку область течії розбивається на кінцеві елементи. Для створення «сітки» у ANSYS застосовується програма ICEM CFD. Ця програма дозволяє в автоматичному та напівавтомати-

чному режимі побудувати розрахункову просторову сітку з довільною геометрією.

Комплексна система генерації будь-яких типів розрахункових сіток має прямий інтерфейс із CAD - системами (Pro/E, Catia, Unigraphics, I-DEAS, SDR, Icem Surf).

Тиск газу (рис. 2.1) поблизу увігнутої поверхні лопатки підвищений. На вході в лопаткову решітку поблизу опуклої поверхні лопатки тиск має найменше значення. Такий розподіл тисків відповідає результатам експериментальних досліджень.

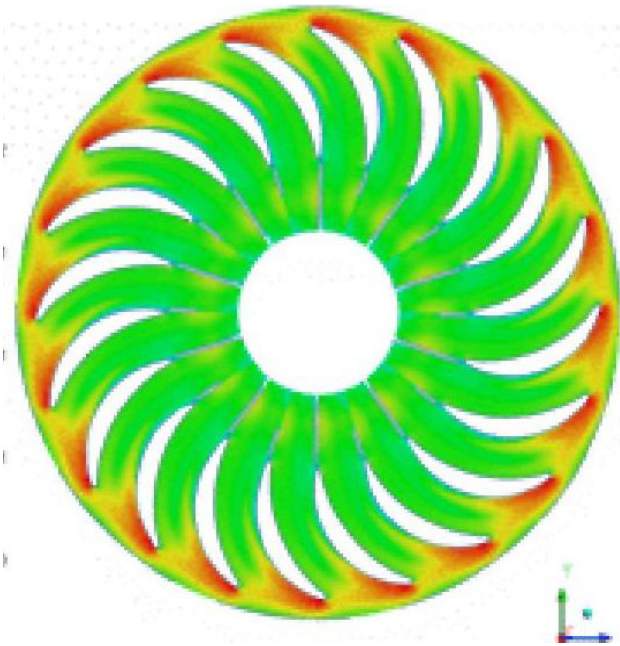


Рисунок 2.2 - Розподіл швидкостей у лопатковій решітці ЗНА (ANSYS CFX)

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗНА

---

Якісна картина розподілу швидкостей також відповідає результатам експериментальних досліджень.

Ще для одного варіанта проточної частини відцентрового компресора на рисунках 2.3 і 2.4 показані розподіли тисків і швидкостей у зворотному напрямному апараті з лопатками сталі товщини. Значення параметрів потоку отримані з використанням програмного комплексу ANSYS CFX.

При виконанні цих розрахунків використовувалася  $k - \varepsilon$  - модель турбулентності для великих чисел Рейнольдса.

Були задані такі граничні умови – тиск газу на вході в ступінь, температура газу, масова витрата, частота обертання вала.

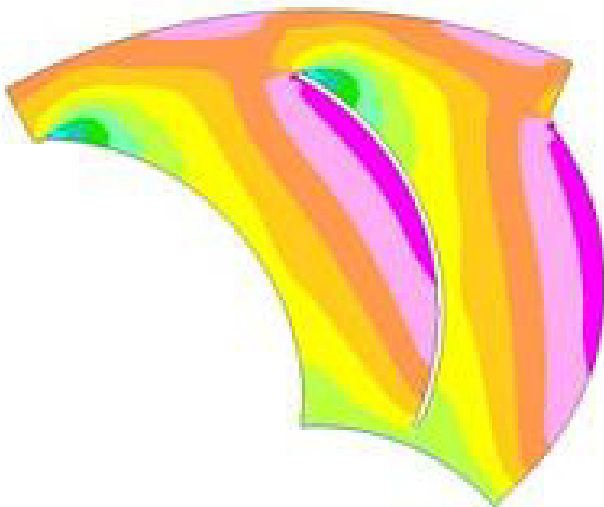


Рисунок 2.3 - Розподіл тисків у ЗНА  
(ANSYS CFX)

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗНА

---

Течія газу моделювалася на підставі стаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса. Розраховані статичні тиски усереднювалися за масовою витратою.

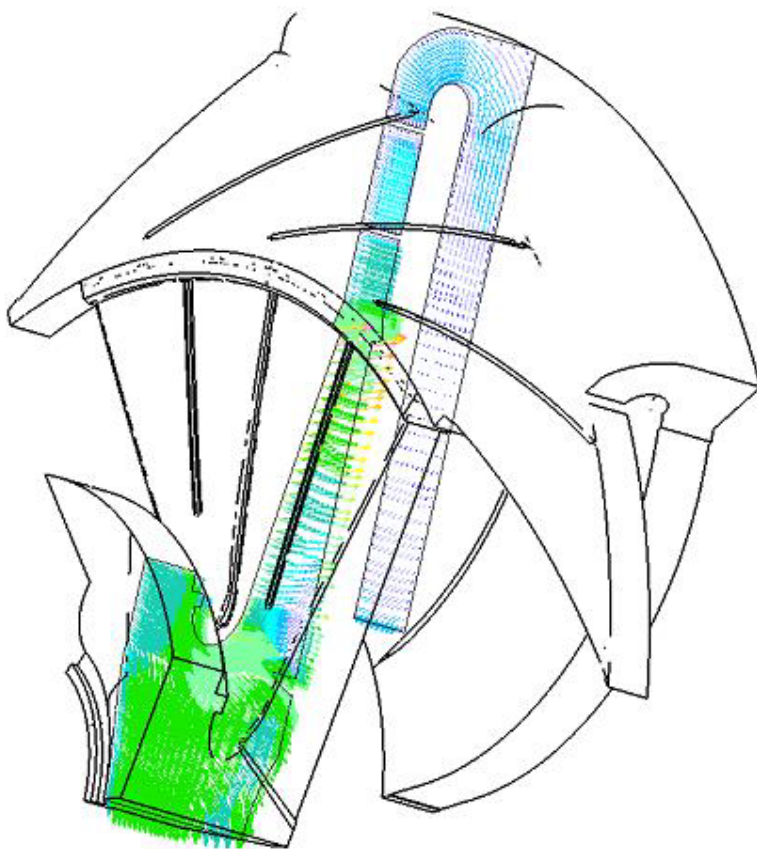


Рисунок 2.4 - Розподіл швидкостей у ЗНА  
(ANSYS CFX)



Видно, що для ЗНА із профільованими лопатками розподіли швидкостей і тисків є більш рівномірними, ніж для ЗНА з лопатками сталої товщини.

### 2.2 Розрахунок параметрів потоку за допомогою FlowVision

Комплекс FlowVision ґрунтується на чисельному розв'язанні тривимірних стаціонарних і нестаціонарних рівнянь динаміки рідини і газу, які містять закони збереження маси, імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса), рівняння стану. Для розрахунку складних рухів рідини і газу, що супроводжуються додатковими фізичними явищами, такими, як турбулентність, горіння, контактні границі поділу, пористість середовища, теплоперенесення і т. ін., математична модель доповнюється додатковими рівняннями, що описують ці явища.

FlowVision використовує кінцево-об'ємний підхід для апроксимації рівнянь математичної моделі. Рівняння Нав'є-Стокса розв'язуються методом розщеплення за фізичними процесами (проекційний метод MAC).

У комплексу FlowVision використовуються такі технології обчислювальної гідродинаміки і комп'ютерної графіки:

- прямокутна розрахункова сітка з локальним здрібнюванням розрахункових комірок;
- апроксимація криволінійних границь розрахункової області методом підсіткового розрізнення геометрії;
- імпорт геометрії із систем САПР і кінцево-елементних систем через поверхневу сітку;
- ядро програми написане мовою C++;
- має клієнт-серверну архітектуру;

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗНА

- користувальницький інтерфейс написаний для операційних систем сімейства Windows;

- система аналізу результатів розрахунків використовує високоякісну графіку на основі OpenGL.

На рисунку 2.5 показаний розподіл швидкостей у поздовжньому перерізі ступеня відцентрового компресора, отриманий за допомогою FlowVision.

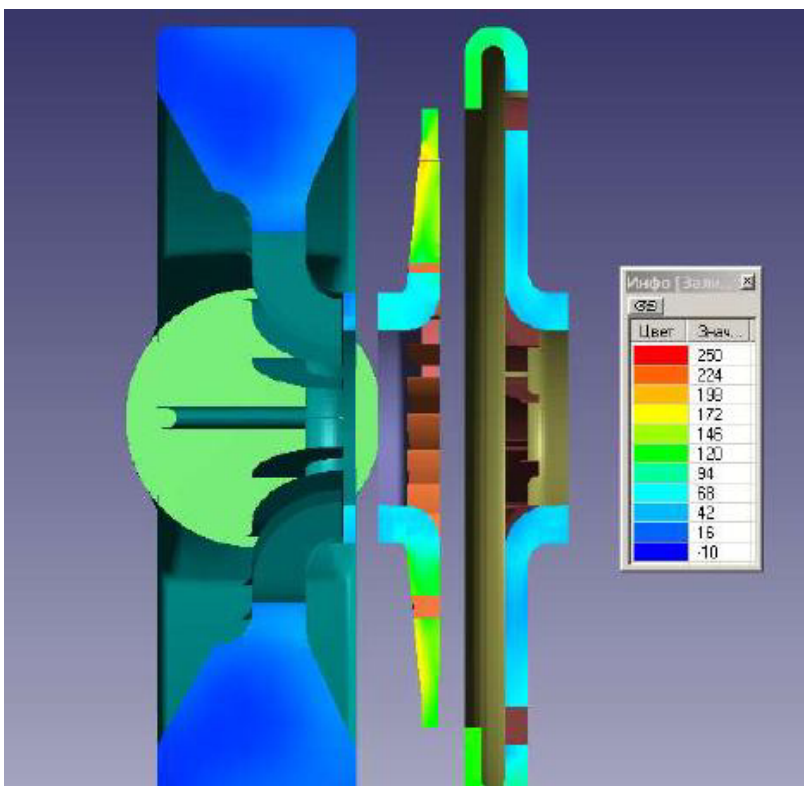


Рисунок 2.5 - Розподіл швидкостей у поздовжньому перерізі ступеня відцентрового компресора

На рисунку 2.6 показаний розподіл швидкостей у зворотному напрямному апараті відцентрового компресора, а на рисунку 2.7 - розподіл швидкостей на виході із ЗНА, які отримані за допомогою FlowVision.

Результати розрахунку залежать від ряду факторів - побудови розрахункової сітки, типу граничних умов, вибору моделі турбулентності [8]. Важливим є також «настроювання» комплексу, яке залежить від кваліфікації розраховувача, його вміння працювати із програмним комплексом, а також знання фізичних процесів, що відбуваються у машині, яка розраховується.

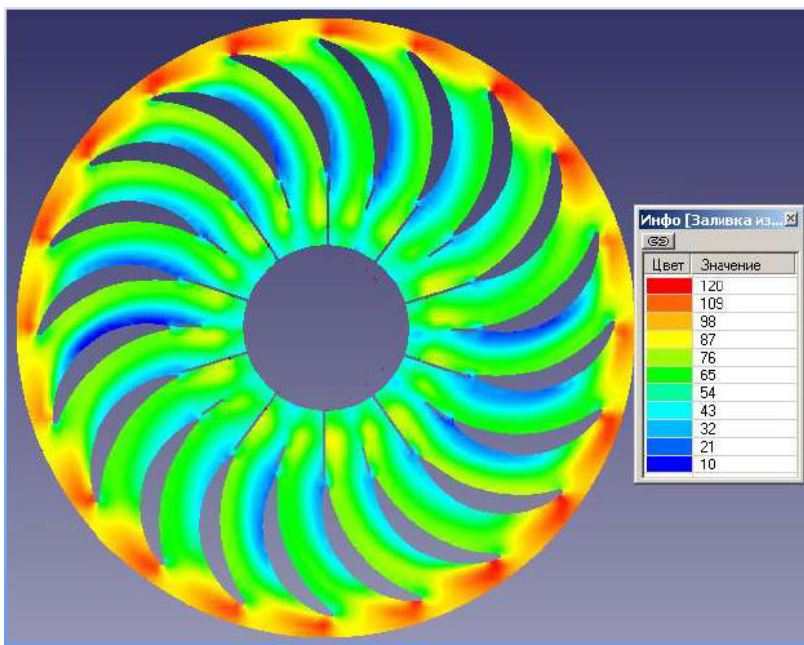


Рисунок 2.6 - Розподіл швидкостей у ЗНА

Якісні картини розподілу швидкостей, які отримані за допомогою ANSYS CFX, подібні до розподілів, розрахованих у FlowVision.

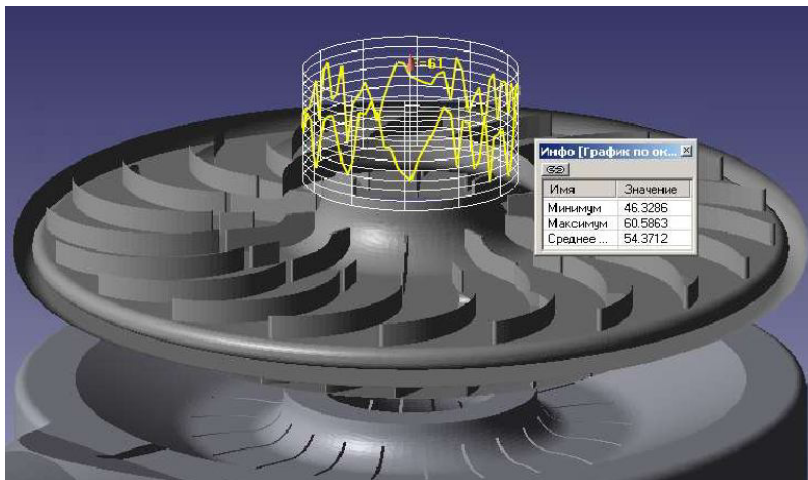


Рисунок 2.7 - Розподіл швидкостей на виході із ЗНА

Результати розрахунків швидкостей і тисків у проточних частинах турбокомпресорів дозволяють виявити нерівномірність розподілу параметрів потоку у різних напрямках, наприклад, у коловому напрямку.

### 2.3 Розрахунок параметрів потоку за допомогою комплексу програм FlowRC

Разом із використанням універсальних програмних комплексів для розрахунку течії газу в каналах турбома-

шин залишаються актуальними методи поелементного термогазодинамічного розрахунку.

Математичні моделі і програмний комплекс FlowRC (Flow Return Channel) дозволяють розрахувати параметри потоку у зворотному напрямному апараті відцентрового компресора.

Для створення математичних моделей вибирається фізична модель стаціонарної течії газу без теплообміну із зовнішнім середовищем.

**Поворотне коліно.** Для поворотного коліна (рис. 2.8) розглядається течія газу в осесиметричному криволінійному каналі із закрученням потоку на вході.

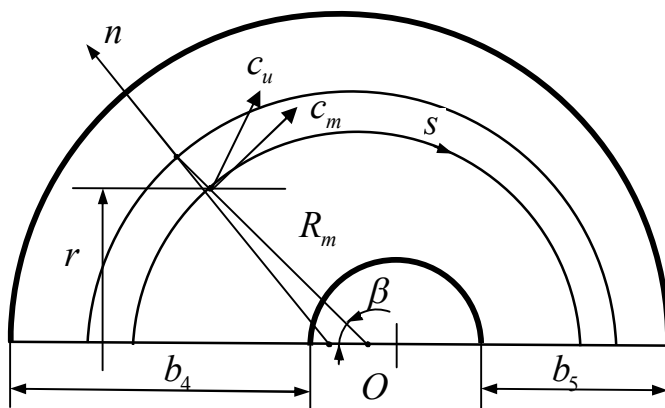


Рисунок 2.8 – Схема поворотного коліна

Розглядається течія нев'язкого газу в ядрі потоку і течія в'язкого газу в прилеглому шарі.

Для виведення розрахункових залежностей використовуються диференціальні рівняння руху, які для нев'язкого газу мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} - c_m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial s} + \frac{c_u^2}{r} \cdot \cos \beta &= 0, \\
 -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{c_u^2}{r} \cdot \sin \beta + \frac{c_m^2}{R_m} &= 0.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

При створенні математичної моделі використовується криволінійна система координат  $s, n$ , де  $s$  – координата уздовж квазілінії течії;  $n$  – координата уздовж ортогоналі до  $s$  [9].

Розглядається потік з нерівномірним розподілом повного тиску вздовж нормалі [10]:

$$p^* = p + \rho \cdot \frac{c_u^2}{2} + \rho \cdot \frac{c_m^2}{2} = f_1(n).
 \tag{2.2}$$

Зміна повного тиску вздовж нормалі береться у вигляді

$$f_1(n) = a_0 + a_1 \cdot n + a_2 \cdot n^2.
 \tag{2.3}$$

Коефіцієнти  $a_0, a_1, a_2$  обчислюються із граничних умов:

$$\begin{aligned}
 \text{при } n_i=0, a_0 &= p_{\text{вн}}^*, \text{ при } n=b, p_{\text{зов}}^* = p_{\text{вн}}^* + a_1 \cdot b + a_2 \cdot b^2, \\
 a_1 &= \frac{p_{\text{зов}}^* - p_{\text{вн}}^*}{b} - a_2 \cdot b.
 \end{aligned}$$

Після диференціювання рівняння (2.3) отримаємо таку формулу:

$$\frac{\partial f_1}{\partial n} = \frac{(p_{зоб}^* - p_{вн}^*)}{b} - a_2 \cdot b + 2 \cdot a_2 \cdot n = H + L \cdot n . \quad (2.4)$$

Рівняння (2.2) диференціюється за  $s$  і  $n$  з урахуванням того, що у ЗНА відцентрових компресорів величина густини газу практично є сталою:

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial s} + c_u \cdot \frac{\partial c_u}{\partial s} + c_m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial s} = 0 , \quad (2.5)$$

$$\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} + c_u \cdot \frac{\partial c_u}{\partial n} + c_m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial n} = \frac{H + L \cdot n}{\rho} . \quad (2.6)$$

Використовуючи рівняння (2.5) і (2.6), у системі рівнянь (2.1) замінюються компоненти, що містять частинні похідні від тиску  $\frac{\partial p}{\partial s}$  і  $\frac{\partial p}{\partial n}$ . Тоді

$$c_u \cdot \frac{\partial c_u}{\partial n} + c_m \cdot \frac{\partial c_m}{\partial n} + \frac{c_u^2}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial n} + \frac{c_m^2}{R_m} - \frac{(H + L \cdot n)}{\rho} = 0 , \quad (2.7)$$

$$c_u \cdot \frac{\partial c_u}{\partial s} + \frac{c_u^2}{r} \cdot \frac{\partial r}{\partial s} = 0 . \quad (2.8)$$

Після перетворення рівняння (2.7) отримаємо залежність для визначення меридіональної проекції швидкості

$$\frac{\partial c_m}{\partial n} = \frac{(H + L \cdot n)}{\rho \cdot c_m} \cdot \frac{c_m}{R_m}. \quad (2.9)$$

Значення меридіональної проекції швидкості визначається шляхом чисельного розв'язання рівняння (2.9), наприклад, методом Рунге-Кутта четвертого порядку [11].

Колова проекція швидкості обчислюється за відомою формулою

$$c_u = \frac{c_{u4} \cdot r_4}{r}, \quad (2.10)$$

швидкість потоку газу - за формулою

$$c = \sqrt{c_u^2 + c_m^2}, \quad (2.11)$$

а кут потоку -

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{c_m}{c_u}. \quad (2.12)$$

**Лопаткова решітка.** Для лопаткових решіток розглядається течія газу в криволінійному міжлопатковому каналі у шарі змінної товщини (рисунок 1.9).

Для розрахунку течії газу в лопаткових решітках зворотного напрямного апарата використовується система рівнянь, яка містить рівняння нерозривності, моменту імпульсу, стану, процесу, енергії [12]:



$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \cdot \bar{c}) &= 0; \\ \frac{d(c_u \cdot m \cdot r)}{d\tau} &= M_z; \\ p \cdot v &= z \cdot R \cdot T; \\ p \cdot v^n &= \text{const}; \\ \Delta i^* - q_{\text{зог}} &= 0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Використовуючи газодинамічні функції, рівняння нерозривності для трубки течії шириною  $\Delta n$  можна записати у такому вигляді:

$$\Delta \bar{m} = \lambda \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot a_{\text{кр}} \cdot \rho^* \cdot \Delta n \cdot (2\pi \cdot r \cdot \sin \alpha - \delta' \cdot z_l). \quad (2.14)$$

Рівняння моменту імпульсу набере вигляду

$$\begin{aligned} \Delta \bar{m} \cdot a_{\text{кр}} \cdot (r_{\text{ex}} \cdot \lambda_{\text{ex}} \cdot \cos \alpha_{\text{ex}} - r \cdot \lambda \cdot \cos \alpha) - \\ - \int_{\text{ex}}^i z_l \cdot r \cdot \Delta p \cdot \Delta n \cdot dr = 0. \end{aligned} \quad (2.15)$$

У цих рівняннях  $\lambda = c / a_{\text{кр}}$  - коефіцієнт швидкості (відносна швидкість);  $a_{\text{кр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1}} \cdot R \cdot T^*$  - критична швидкість;  $\varepsilon(\lambda) = \frac{\rho}{\rho^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}}$  - газодинамічна функція густини;

$\Delta p = p_{yв} - p_{он}$  - різниця тисків на увігнутій  $p_{yв}$  і опуклій  $p_{он}$  поверхнях лопатки;

$\delta' = \delta_l + \delta_{\Sigma}^*$ ;  $\delta_l$  - товщина лопатки;  $\delta_{\Sigma}^*$  - сумарна товщина витиснення.

Товщина витиснення визначається за розрахованим значенням товщини втрати імпульсу примежового шару методом послідовних наближень.

Розрахунок параметрів примежового шару у лопаткових решітках ЗНА можна виконати за допомогою однієї із теорій турбулентного примежового шару, наприклад, за напівемпіричним методом Л. Г. Лойцяньського.

Товщина втрати імпульсу визначається за формулою [13]:

$$\delta^{**} = 0,0159 \cdot Re^{-0,15} \cdot \lambda^{-3,55} \cdot \left( \int_0^l \lambda^4 \cdot dl \right)^{0,85} \quad (2.16)$$

Формпараметр

$$f = \frac{\delta^{**}}{c} \cdot \frac{dc}{dl} \cdot G(Re^{**}), \quad (2.17)$$

$$\text{де } G(Re^{**}) = (Re^{**})^{\frac{1}{6}}, \quad Re^{**} = \frac{\delta^{**} \cdot c}{\nu}.$$

Чисельні розрахунки течії газу в проточній частині відцентрового компресора за допомогою простих моделей, які ґрунтуються на розв'язанні рівняння Ейлера і застосуванні напівемпіричних теорій примежового шару, вимагають значно менших витрат часу, ніж розрахунки за більш

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗНА

---

складними моделями течії, у яких чисельно розв'язується рівняння Нав'є-Стокса.

При розв'язанні прямої задачі газодинаміки з рівняння (2.14) визначаються значення середньовитратної відносної швидкості  $\lambda$  для заданих значень  $r$ , обчислюються

значення газодинамічної функції  $\pi(\lambda) = \left( I - \frac{k-I}{k+I} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}}$

і потім, з рівняння (2.15), визначаються розподіли тисків та швидкостей уздовж опуклої та увігнутої поверхонь лопатки. Для виконання цих розрахунків потрібно задати закон зміни тисків (або швидкостей) за кроком решітки. Для початкового наближення можна брати лінійний закон зміни тиску за кроком решітки.

Для розв'язання зворотної задачі газодинаміки виконуються перетворення рівнянь (2.14) і (2.15):

$$\lambda \cdot \varepsilon(\lambda) \cdot \sin \alpha = \frac{\Delta \bar{m} \cdot R \cdot T^*}{a_{кр} \cdot p^* \cdot \Delta n \cdot 2\pi \cdot r \cdot \tau} = A(r), \quad (2.18)$$

$$\lambda \cdot \cos \alpha = \frac{1}{r} \cdot \left( r_{ex} \cdot \lambda_{ex} \cdot \cos \alpha_{ex} - \frac{z_l \cdot \Delta n}{\Delta m \cdot a_{кр}} \cdot I \right) = B(r), \quad (2.19)$$

$$\text{де } \tau = I - \frac{(\delta_l + \delta_\Sigma^*) \cdot z_l}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot \sin \alpha_l}, \quad I = \int_{ex}^i \Delta p \cdot r \cdot dr.$$

Різниця тисків  $\Delta p$  при заданому законі зміни тисків за кроком решітки є функцією двох параметрів:  $\lambda$  і якої-небудь зі швидкостей уздовж опуклої  $\lambda_{on}$  або увігнутої  $\lambda_{ye}$  поверхонь. Визначивши характер зміни швидкості  $\lambda_{on}$ ,  $\lambda_{ye}$  уздовж поверхні лопатки, можна визначити  $\lambda$  і  $\alpha$ , розв'язуючи систему рівнянь (2.18) і (2.19).

За допомогою даного методу можна визначити швидкості і тиски газу у зворотному напрямному апараті.

На рисунку 2.9 показані розподіли швидкостей за довжиною поворотного коліна уздовж втулкової і периферійної поверхонь при різних  $b_5 / b_4$ .

Розрахунок параметрів потоку у зворотному напрямному апараті відцентрового компресора за допомогою програмного комплексу FlowRC дозволяє визначити вплив геометричних параметрів на структуру потоку при різних режимах течії і вибрати такі конструктивні параметри ЗНА, що забезпечують сприятливу структуру потоку. Для забезпечення безвідривної течії дифузорність потоку не повинна перевищувати критичного значення. Приклади залежностей значень коефіцієнтів дифузорності від величини закручування потоку і відношення  $b_5/b_4$  наведені на рисунку 2.10.

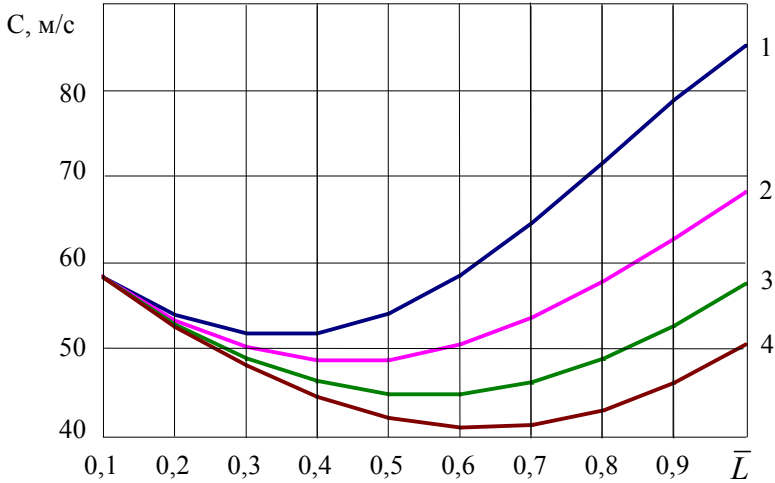
Коефіцієнт дифузорності визначається як відношення максимальної швидкості потоку до мінімальної на даній ділянці каналу.

Розроблений комплекс програм дозволяє отримати інформацію для вибору оптимального конструктивного варіанта.

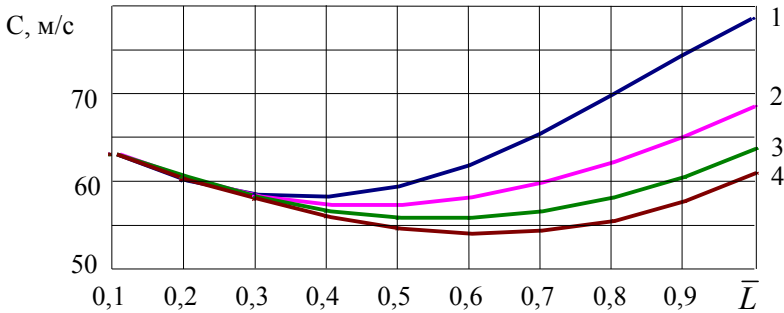
Порівняння результатів розрахунку параметрів потоку з експериментальними даними підтверджують можливість використання запропонованого методу для проведен-

## 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПОТОКУ В ЗНА

ня чисельних досліджень ЗНА при проектуванні відцентрового компресора.



а



б

Рисунок 2.9 – Розподіли швидкостей по довжині поворотного коліна уздовж втулкової (а) і периферійної (б) поверхонь при різних  $b_5/b_4$ :

1 - 0,6; 2 - 0,8; 3 - 1,0; 4 - 1,2

(кут потоку  $\alpha_2 = 17^\circ$ ; витрата  $\bar{m} = 1,46 \text{ кг/с}$ )

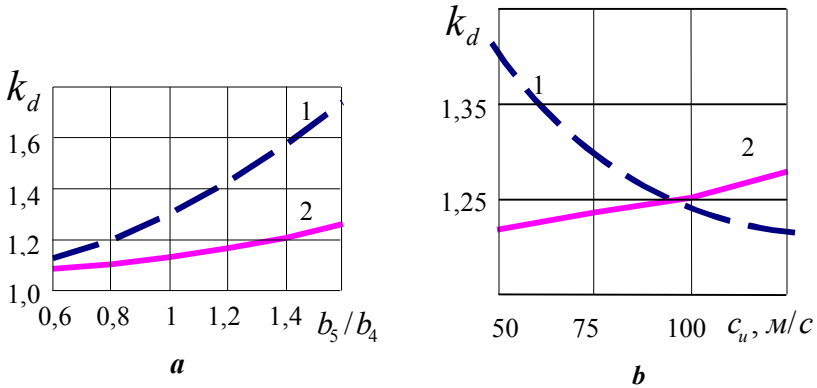


Рисунок 2.10 – Залежності коефіцієнта дифузійності для  $\bar{m} = 1,5 \text{ кг/с}$ : **a** – від відношення  $b_5 / b_4$  ( $\alpha_2 = 17^\circ$ );  
**b** – від закручення потоку  $c_u$  ( $b_5 / b_4 = 1,4$ );  
 1 – втулка; 2 - периферія

У додатку А наведені порівняння результатів розрахунку параметрів потоку з експериментальними даними.

Програмний комплекс FlowRC (Flow Return Channel) складається із програми для розрахунку поворотного коліна і програми для розрахунку лопаткової решітки зворотного напрямного апарата.

У додатку Г наведений текст програми для розрахунку поворотного коліна ЗНА. У додатку Д наведений текст програми для розрахунку лопаткової решітки ЗНА.

### Питання для самоконтролю

1. Який фізичний зміст має рівняння Нав'є-Стокса?
2. Які параметри потоку є невідомими у рівнянні Нав'є-Стокса?
3. Що означає осереднене за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса?
4. Визначте суть поняття «дивергенція вектора швидкості».
5. Що означає термін «масова сила»?
6. Яку розмірність має коефіцієнт динамічної в'язкості?
7. Яку назву мають диференціальні рівняння стаціонарного руху для нев'язкого газу?
8. Яким способом виконується розв'язання диференціальних рівнянь методом Рунге-Кутта четвертого порядку?
9. Які рівняння містить система рівнянь для розрахунку течії газу в лопаткових решітках зворотного напрямного апарата?
10. Наведіть рівняння стану.
11. Який вигляд має рівняння процесу?
12. Який вигляд має рівняння моменту імпульсу?
13. Який вигляд має рівняння енергії?
14. Як визначається коефіцієнт швидкості (відносна швидкість)?
15. Як визначається критична швидкість?
16. Дайте визначення газодинамічної функції густини.
17. Як визначається газодинамічна функція тиску?
18. Як визначається товщина витиснення?
19. Як визначається товщина втрати імпульсу?
20. Як визначається формпараметр?
21. Як визначається коефіцієнт дифузорності?
22. Наведіть залежність значення коефіцієнта дифузорності від відношення  $b_5 / b_4$ .

### 3 ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

Проектувальний розрахунок зворотного напрямного апарата виконується з метою визначення основних розмірів проточної частини і параметрів газу. Ці параметри є базовими для конструювання ЗНА.

Розрахунок зворотного напрямного апарата виконується з використанням результатів варіантного розрахунку, розрахунку робочих коліс та дифузорів [14,15, 16].

#### 3.1 Вихідні дані

Вихідними даними для розрахунку зворотного напрямного апарата є: діаметр на виході з дифузора  $D_4$ ; діаметр на вході у лопаткову решітку  $D_5$ ; зовнішній діаметр робочого колеса  $D_2$ ; діаметр покривного диска на вході у робоче колесо наступного ступеня  $D_0$ ; діаметр втулки на вході у робоче колесо наступного ступеня  $d_0$ ; ширина каналу на виході з дифузора  $b_4$ ; товщина лопатки на виході ЗНА  $\delta_6$ ; абсолютна швидкість потоку на виході з робочого колеса  $c_2$ ; абсолютна швидкість на виході з дифузора  $c_4$ ; кут потоку газу на виході з дифузора  $\alpha_4$ ; кут відставання потоку газу в ЗНА  $\Delta\alpha_6$ ; значення оптимальної густоти лопаткової решітки ЗНА  $\bar{L}_{om}$ ; температура газу на вході у компресор  $T_{ex}$ ; температура газу на виході з робочого колеса  $T_2$ ; теплоємність газу при сталому тиску



### 3 ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗНА

$c_p$ ; густина газу на вході у компресор  $\rho_{ex}$ ; коефіцієнт стисливості газу на вході  $z_{ex}$ ; газова стала  $R$ ; газодинамічна функція  $\sigma = \eta_n \cdot \frac{k}{k-1}$ ; коефіцієнт  $k_u$ ; коефіцієнт  $k_{мер}$ ; коефіцієнт  $k_F$ .

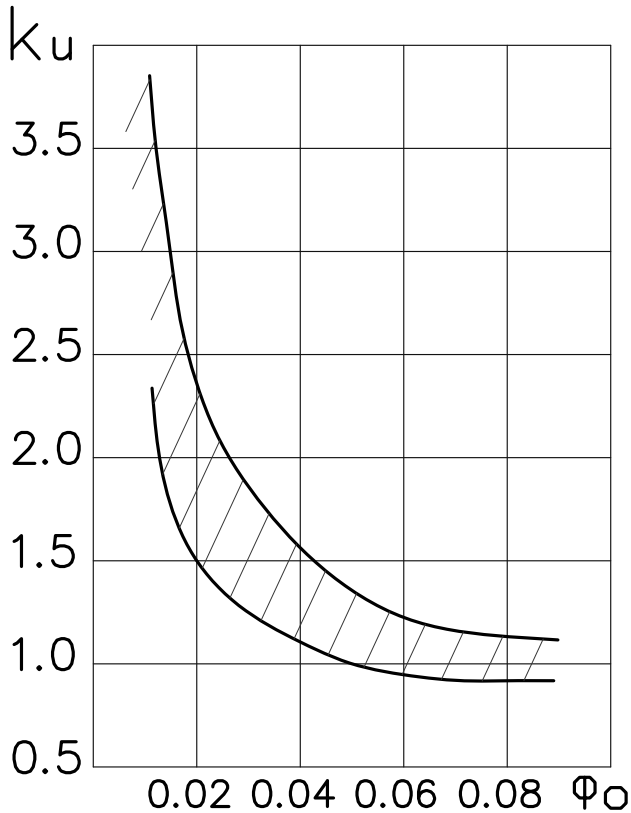


Рисунок 3.1 – Залежність  $k_u = b_5 / b_4$   
від коефіцієнта витрати  $\Phi_0$

Коефіцієнт  $k_u = b_5 / b_4$  вибирається залежно від значень коефіцієнта витрати  $\Phi_0$ . Для вибору значень коефіцієнта  $k_u$  можна використовувати дані рисунка 3.1.

Діаметр на вході у лопаткову решітку  $D_5 \approx D_4$ . Товщина лопатки на виході ЗНА  $\delta_6$  задається конструктивно. Кут відставання потоку газу в ЗНА  $\Delta\alpha_6$  вибирається з діапазону 1-2 град.

### 3.2 Послідовність проектувального розрахунку ЗНА

При виконанні проектувального розрахунку визначаються параметри потоку і розміри проточної частини зворотного напрямного апарата. Нижче наведені розрахункові залежності та пояснення до вибору значень тих або інших параметрів, необхідних для виконання розрахунків.

1 Ширина каналу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$b_5 = k_u \cdot b_4. \quad (3.1)$$

2 Кут потоку на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$\alpha_5 = \arctg \left[ \left( \frac{b_4}{b_5} \right) \cdot k_{тер} \cdot \operatorname{tg} \alpha_4 \right]. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт тертя  $k_{тер}$  вибирається з діапазону 1,3-1,5 для лопаткового дифузора та з діапазону 1,5-1,7 для безлопаткового дифузора.

3 Вхідний кут лопатки ЗНА

$$\alpha_{,5} = \alpha_5. \quad (3.3)$$

Значення кута округлюється до цілого значення.

4 Відносний радіус поворотного коліна

$$\left( \frac{r_{нк}}{b_4} \right)_{онм} = \left( \frac{\rho_{нк}}{b_4} \right)_{онм} \cdot \sin^2 \left( \frac{\alpha_4 + \alpha_5}{2} \right) - \frac{b_5 + b_4}{4 \cdot b_4}. \quad (3.4)$$

Значення  $\left( \frac{\rho_{нк}}{b_4} \right)_{онм}$  береться з діапазону 7-14.

5 Радіус поворотного коліна

$$r_{нк} = b_4 \cdot \left( \frac{r_{нк}}{b_4} \right)_{онм}. \quad (3.5)$$

6 Швидкість потоку на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$c_5 = c_4 \cdot \frac{\cos \alpha_4}{k_{мер} \cdot \cos \alpha_5}. \quad (3.6)$$

7 Різниця температур газу на вході у лопаткову решітку ЗНА  $T_5$  і на виході з робочого колеса  $T_2$

$$\Delta T_{2-5} = \frac{(c_2^2 - c_5^2)}{2 \cdot c_p}. \quad (3.7)$$

8 Температура газу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$T_5 = T_2 + \Delta T_{2-5}. \quad (3.8)$$

9 Відношення густин газу на вході у лопаткову решітку ЗНА  $\rho_5$  і на вході у компресор  $\rho_{ex}$

$$\varepsilon_5 = \left( \frac{T_5}{T_{ex}} \right)^{\sigma-1}, \quad (3.9)$$

де  $\sigma = \frac{k}{k-1}$  - з варіантного розрахунку.

10 Густина газу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$\rho_5 = \rho_{ex} \cdot \varepsilon_5. \quad (3.10)$$

11 Тиск газу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$p_5 = \rho_5 \cdot z_{ex} \cdot R \cdot T_5 \cdot 10^{-6}. \quad (3.11)$$

12 Відносна ширина каналу на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$\frac{b_6}{D_0} = \frac{1}{1,8} + \sqrt{\left(\frac{1}{1,8}\right)^2 + \frac{k_F}{3,6 \cdot \tau'_6} \cdot \left[1 - (\bar{d}_{0\ i+1})^2\right]}, \quad (3.12)$$

де  $k_F$  береться з діапазону 1,05-1,08;

У першому наближенні значення  $\tau'_6$  дорівнює 0,9. У подальших розрахунках значення коефіцієнта стиснення газу уточнюються (див. п. 18).

13 Ширина на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$b_6 = \left(\frac{b_6}{D_0}\right) \cdot D_{0\ i+1}. \quad (3.13)$$

14 Діаметр на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$D_6 = D_{0\ i+1} + 0,9 \cdot b_6. \quad (3.14)$$

15 Радіус поворотної ділянки

$$r_\kappa = 0,45 \cdot b_6. \quad (3.15)$$

16 Вихідний кут лопатки ЗНА

$$\alpha_{л6} = 90 + \Delta\alpha_6 \quad (3.16)$$

17 Кількість лопаток ЗНА

$$z_6 = \frac{2 \cdot \pi}{\ln(D_5 / D_6)} \cdot \left(\frac{L}{t}\right)_{onm} \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{л5} + \alpha_{л6}}{2}\right), \quad (3.17)$$

### 3 ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗНА

---

де значення оптимальної густоти лопаткової решітки ЗНА  $\bar{L}_{opt}$  береться з діапазону значень 2,1-2,2.

Розрахункове значення кількості лопаток округляється до цілого.

18 Коефіцієнт стиснення газу на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$\tau_6 = 1 - \frac{z_6 \cdot \delta_6}{2 \cdot \pi \cdot D_6}. \quad (3.18)$$

Якщо  $\left| \frac{\tau'_6 - \tau_6}{\tau_6} \right| > 0,001$ , то  $\tau'_6 = \tau_6$  і розрахунок повторюється з п. 12.

19 Площа каналу на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$F_6 = \pi \cdot D_6 \cdot b_6 \cdot \tau_6. \quad (3.19)$$

20 Коефіцієнт стиснення газу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$\tau_5 = 1 - \frac{z_6 \cdot \delta_6 \cdot 0,7}{\pi \cdot D_5 \cdot \sin \alpha_{\lambda 5}}. \quad (3.20)$$

21 Площа каналу на вході у лопаткову решітку ЗНА

$$F_5 = \pi \cdot D_5 \cdot b_5 \cdot \tau_5 \cdot \sin \alpha_{\lambda 5}. \quad (3.21)$$

22 Радіус середньої лінії профілю лопатки

$$R_{л} = (D_5^2 - D_6^2) / (4 \cdot D_5 \cdot \cos \alpha_{л5}). \quad (3.22)$$

Ця формула отримана за умови, що  $\alpha_{л6} = 90^\circ$ . При цьому  $\cos \alpha_{л6}$  дорівнює 0. Якщо  $\alpha_{л6} \neq 90^\circ$ , потрібно використовувати іншу формулу.

23 Радіус центрів кіл  $R_c$

$$R_c = \sqrt{R_{л}^2 + R_6^2}. \quad (3.23)$$

24 Відношення швидкостей на вході і виході лопаткової решітки ЗНА

$$\frac{c_6}{c_5} = \frac{4 \cdot D_5 \cdot b_5 \cdot \tau_5 \cdot \sin \alpha_5}{k_F \cdot \left[ D_{0i+1}^2 - (\bar{d}_{0i+1} \cdot D_2)^2 \right]}. \quad (3.24)$$

Значення коефіцієнта  $k_F$  береться з діапазону 1,05-1,08 (див. п.12).

25 Швидкість на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$c_6 = c_5 \cdot \left( \frac{c_6}{c_5} \right). \quad (3.25)$$

26 Температура на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$T_6 = T_2 + \frac{(c_2^2 - c_6^2)}{2 \cdot c_p}. \quad (3.26)$$

27 Відношення густин газу на виході з лопаткової решітки ЗНА  $\rho_6$  і на вході у компресор  $\rho_{ex}$

$$\varepsilon_6 = \left( \frac{T_6}{T_{ex}} \right)^{\sigma-1}. \quad (3.27)$$

28 Густина газу на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$\rho_6 = \rho_{ex} \cdot \varepsilon_6. \quad (3.28)$$

29 Тиск газу на виході з лопаткової решітки ЗНА

$$p_6 = \rho_6 \cdot z_{ex} \cdot R \cdot T_6 \cdot 10^{-6}. \quad (3.29)$$

Визначені розміри дозволяють виконати креслення меридіонального перерізу проточної частини зворотного напрямного апарата.

### **3.3 Профілювання лопаток зворотного напрямного апарата**

Профілювання лопаток ЗНА виконується за умови, що в інтервалі  $R_5 \geq R_j \geq R_6$  площа міжлопаткового каналу



$F_j$  і ширина  $b_j$  змінюються пропорційно радіусу  $R_j$ . Розрахунки виконуються для 9 перетинів каналу ( $j = 1-9$ ).

Для кожного ступеня проміжного типу розрахунки виконуються послідовно згідно з нижченаведеними формулами.

1 Радіус  $j$ -го перерізу каналу

$$R_j = \frac{D_6}{2} + \frac{D_5 - D_6}{2} \cdot a_j, \quad (3.30)$$

де  $a_j = 0,95; 0,9; 0,75; 0,6; 0,5; 0,4; 0,25; 0,1; 0,05$ .

2 Ширина лопаткової решітки ЗНА у  $j$ -му перерізі каналу

$$b_j = b_5 + \frac{(b_6 - b_5)}{(R_5 - R_6)} \cdot (R_5 - R_j). \quad (3.31)$$

3 Кут лопатки у  $j$ -му перерізі

$$\alpha_{lj} = \arccos \left( \frac{R_a^2 - R_c^2 + R_j^2}{2 \cdot R_l \cdot R_j} \right). \quad (3.32)$$

4 Різниця між площею на вході у міжлопатковий канал ЗНА  $F_5$  і площею у  $j$ -му перерізі каналу  $F_j$

$$\Delta F_j = \frac{(F_5 - F_6) \cdot (R_5 - R_j)}{(R_5 - R_6)}. \quad (3.33)$$

5 Площа міжлопаткового каналу у  $j$  – му перерізі

$$F_j = F_5 - \Delta F_j. \quad (3.34)$$

6 Товщина лопатки у  $j$  – му перерізі

$$\delta_j = \frac{l}{z_5} \cdot \left( 2 \cdot \pi \cdot R_j \cdot \sin \alpha_{lj} - \frac{F_j}{b_j} \right). \quad (3.35)$$

7 Колова проекція товщини лопатки

$$\delta_{uj} = \delta_j / \sin \alpha_{lj}. \quad (3.36)$$

Товщина лопатки  $\delta_j$  визначається вздовж нормалі до середньої лінії лопатки.

Для побудови профілю лопатки найчастіше використовується товщина  $\delta_u$ , яка визначається вздовж кола  $R_j$  (див. рис. 1.9).

#### Питання для самоконтролю

1. Якою є мета проектувального розрахунку зворотного напрямного апарата?
2. Які параметри є вихідними даними для розрахунку зворотного напрямного апарата?
3. Як залежить коефіцієнт  $k_u$  від значень коефіцієнта витрати  $\Phi_0$ ?
4. Як визначається ширина каналу на вході у лопаткову решітку зворотного напрямного апарата?

### 3 ПРОЕКТУВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ЗНА

---

5. Як визначається кут потоку на вході у лопаткову решітку ЗНА?
6. Як визначається вхідний кут лопатки ЗНА?
7. Як визначається радіус поворотного коліна?
8. Як визначається швидкість потоку на вході у лопаткову решітку ЗНА?
9. Як визначається ширина на виході з лопаткової решітки ЗНА?
10. Як визначається діаметр на виході з лопаткової решітки ЗНА?
11. Як визначається вихідний кут лопатки ЗНА?
12. Як визначається кількість лопаток ЗНА?
13. Як визначається густина лопаткової решітки?
14. Як визначається коефіцієнт стиснення газу?
15. Як визначається радіус середньої лінії профілю лопатки?
16. Як визначається швидкість газу на виході з лопаткової решітки ЗНА?
17. Як визначається температура газу на виході з лопаткової решітки ЗНА?
18. Як визначається тиск газу на виході з лопаткової решітки ЗНА?
19. Як визначається профіль лопатки ЗНА?
20. Як виконується побудова профілю ЗНА?

#### 4 ІНСТРУКЦІЯ ДЛЯ РОБОТИ З ПРОГРАМОЮ *CalcRetC.exe*

Розрахунок зворотного напрямного апарата можна виконати, використовуючи файл *CalcRetC.exe*. Після завантаження цього файлу на екрані дисплея з'являється таблиця вихідних даних (рис. 4.1).

Введення цифрових значень виконується за допомогою клавіші "ENTER".

Вихідні дані для розрахунку ЗНА беруться із:

- завдання для практичних занять, або для курсового проекту, або для дипломного проекту;
- результатів визначення теплофізичних властивостей газу (наприклад, за допомогою програми DPG [14]);
- результатів розрахунку варіантів [14];
- результатів розрахунку робочих коліс (файл *RRK.rez* [15]);
- результатів розрахунку дифузорів (файл *RD.rez* [16]).

Вихідні дані, які потрібно внести до таблиці вихідних даних на екрані дисплея, наведені у таблиці 4.1. У таблиці зазначається джерело для вибору значень параметра, який задається.

Значення оптимальної густоти лопаткової решітки зворотного напрямного апарата  $\bar{L}_{om}$  згідно з [3] дорівнює 2,1 - 2,2.

Товщина лопатки  $\delta_6$  на виході ЗНА береться залежно від виду заготовки. Для литих ЗНА без механічної обробки лопаток  $\delta_6=6-10$  мм, для фрезерованих лопаток  $\delta_6=4-6$  мм.

<b>ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБРАТНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА</b>	
<b>СТРЕЛКИ</b> – управление курсором	<b>INSERT</b> – вставка символа
<b>ENTER</b> – переход к следующему данному	<b>DELETE</b> – удаление символа
<b>ESC</b> – конец ввода данных	
Наружный диаметр рабочего колеса	D2 = 0.650 м
Диаметр на входе в лопаточную решетку ОНА	D5 = 1.050 м
Диаметр покрывного диска РК следующей ступени	D0 = 0.340 м
Диаметр втулки РК следующей ступени	Dvt = 0.200 м
Ширина канала на выходе из диффузора	B4 = 0.035 м
Толщина лопаток ОНА на выходе	De16 = 0.006 м
Абсолютная скорость на выходе из РК	C2 = 200.000 м/с
Скорость на выходе из диффузора	C4 = 100.000 м/с
Угол потока на выходе из диффузора	Alf4 = 20.000 град
Оптимальное значение густоты решетки ОНА	L/t = 2.100 К
Температура газа на входе в компрессор	Tn = 295.000 К
Температура газа на выходе из РК	T2 = 310.000 К
Теплоемкость при постоянном давлении	Cp = 2430.000 Дж/кгК
Плотность газа на входе в компрессор	Ron = 20.000 кг/м3
Коэффициент сжимаемости	Zn = 0.950 Дж/кгК
Газовая постоянная	R = 507.000 Дж/кгК
Газодинамическая функция	Sigm = 3.400
Коэффициент ширины поворотного колена	Ku = 1.300
Коэффициент трения	<b>Ktr = 1.350</b>

Рисунок 4.1 – Вікно програми *CalcRetC.exe* для занесення вихідних даних

Значення коефіцієнта ширини поворотного коліна  $k_u$  визначається залежно від значень коефіцієнта витрати  $\Phi_0$  з використанням даних рисунка 3.1.

Таблиця 4.1 - Вихідні дані для розрахунку ЗНА

Номер	Назва параметра	Познач. параметра	Одиниця вимірювання	Примітка
1	2	3	4	5
1	Зовнішній діаметр робочого колеса	$D_2$	м	із розрахунку робочого колеса
2	Діаметр на вході у лопаткову решітку ЗНА	$D_5$	м	$D_5 \approx D_4$
3	Діаметр покривного диска на вході у робоче колесо наступного ступеня	$D_0$		із розрахунку робочого колеса
4	Діаметр втулки на вході у робоче колесо наступного ступеня	$d_0$		із розрахунку робочого колеса
5	Ширина на виході з дифузора	$b_4$	м	із розрахунку дифузора
6	Абсолютна швидкість на виході з робочого колеса	$c_2$	м/с	із розрахунку робочого колеса
7	Абсолютна швидкість на виході з дифузора	$c_4$	м/с	із розрахунку дифузора
8	Кут потоку газу на виході з дифузора	$\alpha_4$	град	із розрахунку дифузора
9	Температура газу на вході у компресор	$T_{ex}$	К	із завдання
10	Температура газу на виході з робочого колеса	$T_2$	К	із розрахунку робочого колеса
11	Теплоємність газу при сталому тиску	$c_p$	Дж/(кг·К)	із теплофізичних властивостей газу

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5
12	Густина газу на вході у компресор	$\rho_{ex}$	кг/м <sup>3</sup>	із теплофізичних властивостей газу
13	Газодинамічна функція	$\sigma$	—	із варіантного розрахунку
14	Коефіцієнт стисливості газу на вході	$z_{ex}$	—	із теплофізичних властивостей газу
15	Газова стала	$R$	Дж/(кг·К)	із теплофізичних властивостей газу
16	Значення оптимальної густоти лопаткової решітки ЗНА	$\bar{L}_{opt}$	-	задається
17	Товщина лопатки на вході ЗНА	$\delta_6$	м	задається
18	Коефіцієнт $k_u$	$k_u$	-	задається
19	Коефіцієнт тертя	$k_{mp}$		задається

Коефіцієнт тертя  $k_{mp}$  береться 1,3-1,5 для ЛД і 1,5-1,7 для БЛД.

Після введення усіх даних натискається "ESC" для початку розрахунку.

У цій програмі задані: кут відставання потоку газу в ЗНА  $\Delta\alpha_6 = 2 \text{ град}$ ; коефіцієнт площі кільцевого коліна  $k_F = 1,05$ ; відносний радіус кривизни  $(\rho_{nk}/b_4)_{opt} = 14$ .

Зовнішній радіус кільцевого коліна розраховується за формулою  $r_k = 0,45 \cdot b_6$ ; діаметр  $D_6 = D_{0i+l} + 0,9 \cdot b_6$ .

Після закінчення розрахунку на екрані дисплея з'являються деякі результати обчислень і запитання: "Бажаєте повторити розрахунок?" (рис. 4.2). Ви відповідаєте

натисканням клавіші "D", якщо ви бажаєте повторити розрахунок, і натисканням клавіші "N", якщо ні.

Якщо з результатів розрахунку випливає, що  $b_6 < b_5$ , то потрібно змінити вихідні дані, насамперед значення  $k_u$ , так, щоб  $b_6 \geq b_5$ .

Також потрібно звернути увагу на такі параметри потоку газу, як швидкості газу на вході та виході з лопаткової решітки ЗНА. Швидкість на виході з лопаткової решітки  $c_6$  має приблизно дорівнювати швидкості на виході з кільцевого коліна  $c_0$ .

У програмі передбачена перевірка правильності введення значень деяких параметрів: газової сталої, діаметрів втулки і покривного диска, теплоємності, густоти решітки. На екрані дисплея з'являється повідомлення «Помилка у вихідних даних!» і вказується неправильне значення параметра.

Наприклад, на рисунках 4.3 і 4.4 показані повідомлення про неправильно задане значення густоти решітки і теплоємності.

Результати розрахунку містяться у файлі *RetC.rez*. Цей файл також містить і вихідні дані.

Приклад файла результатів розрахунку *RetC.rez* наведений у додатку Б.

У таблиці файла *RetC.rez* наведені геометричні параметри лопатки і міжлопаткового каналу:

ORt – відносний радіус;

Rt – радіус, м;

Bt – ширина, м;

Alfalt – кут лопатки, град;

F – площа міжлопаткового каналу, м<sup>2</sup>;



РЕЗУЛЬТАТИ ВИЧИСЛЕННЯ	
B5	= 0.0455 м
D5	= 1.0500 м
C5	= 74.4 м/с
Alfa15	= 21.00 град
rk	= 0.0237 м
Z6	= 11
P5	= 3.6326 МПа
T5	= 317.09 К
Ro5	= 23.78 кг/м3
B6	= 0.0526 м
D6	= 0.3874 м
C6	= 60.9 м/с
Alfa16	= 92.00 град
Rpk	= 0.0391 м
Alfa5	= 20.71 град
P6	= 3.6473 МПа
T6	= 317.47 К
Ro6	= 23.85 кг/м3

Желаете повторить расчет ? (d/n)

Рисунок 4.2 – Вікно програми *CalcRetC.exe* - результати обчислень



Рисунок 4.3 – Вікно програми *CalcRetC.exe* - помилка у вихідних даних

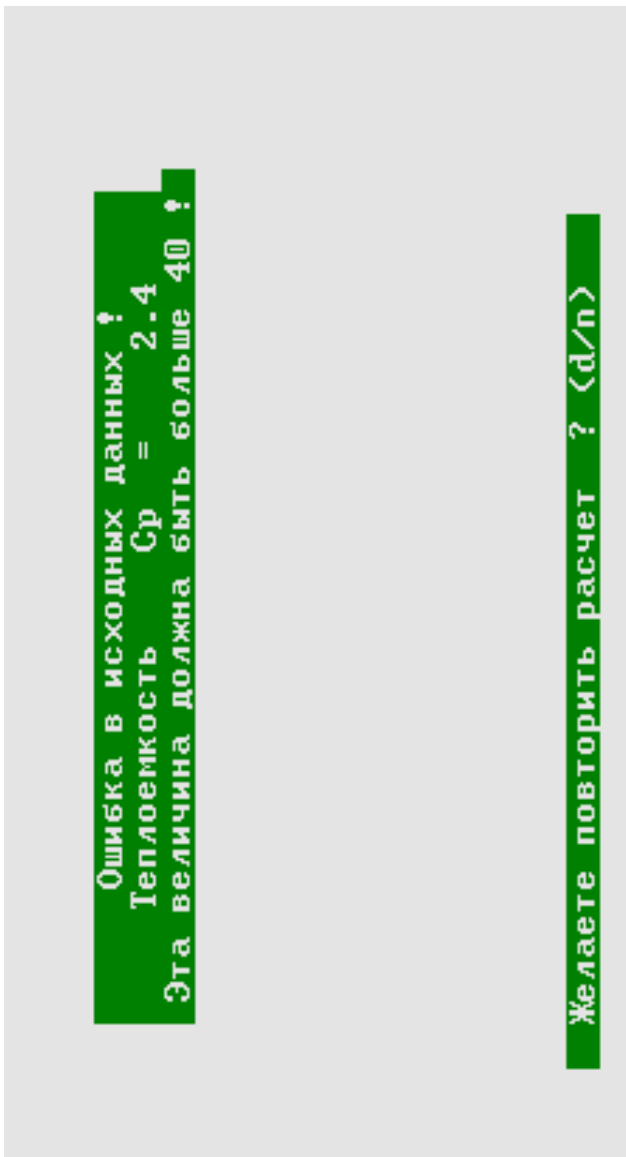


Рисунок 4.4 – Вікно програми *CalcRetC.exe* - помилка у вихідних даних

Deltat – товщина лопатки, м;

Deltau – товщина лопатки вздовж радіуса Rt, м.

Відповідно до цих даних виконується побудова профілю лопатки.

#### **Питання для самоконтролю**

1. Які вихідні дані потрібно задати для виконання розрахунку зворотного напрямного апарата?
2. Як визначаються теплофізичні властивості газу?
3. Чому дорівнює оптимальне значення густоти лопаткової решітки зворотного напрямного апарата?
4. Якими мають бути дії, якщо з результатів розрахунку випливає, що  $b_6 < b_5$ ?
5. Які параметри використовуються для побудови профілю лопатки?

### 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

Конструювання ЗНА (як і інших деталей машин) виконується виходячи із призначення та умов роботи ЗНА. При цьому вибираються матеріал і спосіб виготовлення заготовки; формулюються вимоги, які висуваються до виготовлення.

#### 5.1 Призначення і умови роботи зворотного напрямого апарата

Зворотні напрямні апарати призначені для підведення газу з дифузора попереднього ступеня до робочого колеса наступного ступеня.

У більшості машин необхідне зменшення швидкості газу здійснюється у дифузорі. Тому на вході у ЗНА швидкість газу приблизно дорівнює швидкості газу на вході у робоче колесо наступного ступеня.

Дифузори проектуються так, щоб швидкість газу зменшувалася не більше ніж удвічі. Коли швидкість потоку на виході з робочого колеса є значною (більшою за 250 м/с), то у дифузорі не забезпечується потрібне зменшення швидкості. У такому випадку ЗНА використовується для подальшого зменшення швидкості.

Як правило, величина швидкості газу у ЗНА змінюється мало, а напрямок його руху - значно: на  $(3/4)\pi$  - у меридіональній площині і близько  $(1/6)\pi$  - у радіальній. Структура потоку має складний просторовий характер.

Втрата енергії у ЗНА (енергії, що перетворюється в тепло у процесі переміщення газу) залежить від газодинамічної досконалості проточної частини, тому внутрішні пове-

рхні ЗНА потрібно виконувати з високою точністю і низькою шорсткістю.

Оскільки ЗНА є нерухомою деталлю компресора, то навантаження на його елементи є незначним. Невелика різниця тисків спричиняє невеликі значення газових сил, які визначаються цією різницею.

### **5.2 Конструктивні особливості зворотних напрямних апаратів**

Конструкція зворотного напрямного апарата залежить від конструкції корпусу і технології складання машини.

Зворотний напрямний апарат міститься між робочими колесами сусідніх ступенів, тому для здійснення складання компресора потрібно виконувати ЗНА із двох половин (див. рис. 1.3).

У відцентрових компресорах, у яких корпус має горизонтальне рознімання (рис. 5.1), нижня і верхня половини ЗНА встановлюються у відповідних частинах корпусу. У багатоступінчастих компресорах високого тиску з корпусом типу «барель» (без горизонтального рознімання), але із внутрішнім рознімним корпусом, половини ЗНА встановлюються у відповідних частинах внутрішнього корпусу (рис. 5.2).

У компресорах із горизонтальним розніманням ротор устанавлюється в нижню половину корпусу (рис. 5.3) на вкладиші підшипників. При встановлюванні ротора у внутрішній корпус (рис. 5.4) використовуються тимчасові опори, оскільки штатні підшипники на цій стадії складання компресора відсутні.

Потім встановлюється верхня половина корпусу з розміщеними у ній деталями проточної частини (рис. 5.5).

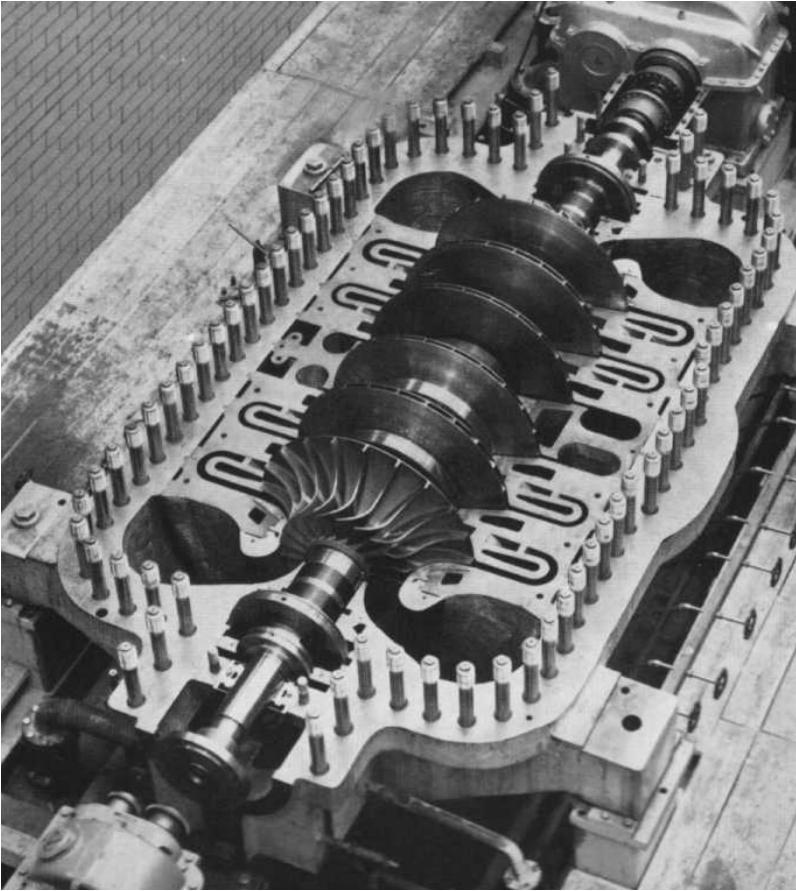


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд проточної частини відцентрового компресора з горизонтальним розніманням корпусу

На рисунку 5.1 показаний загальний вигляд проточної частини компресора зі знятою верхньою частиною корпусу.

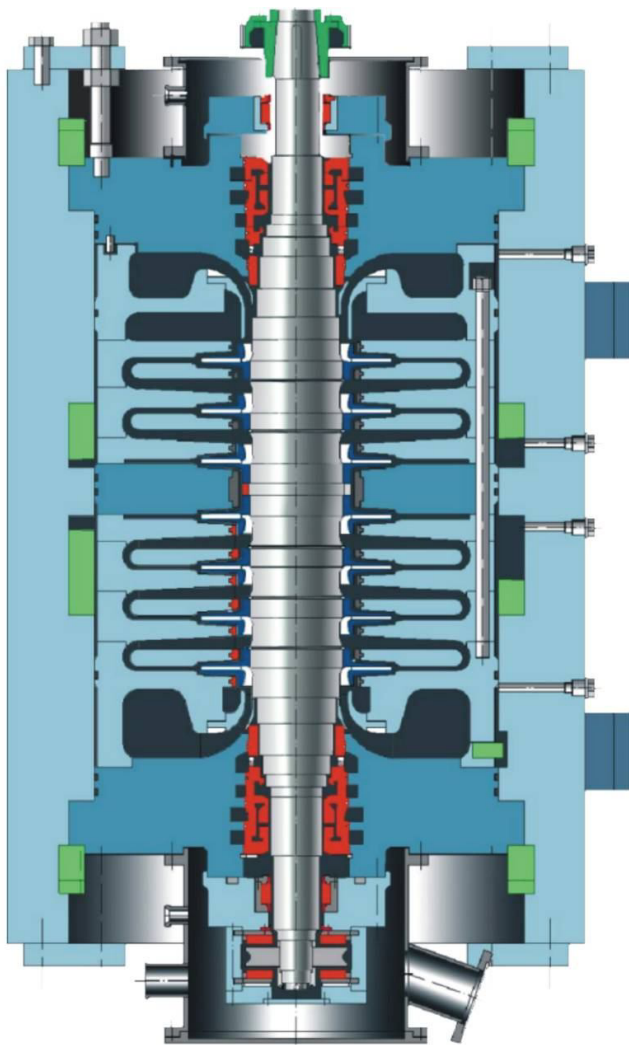


Рисунок 5.2 – Поздовжній розріз компресора з корпусом типу «барель» (без горизонтального рознімання)



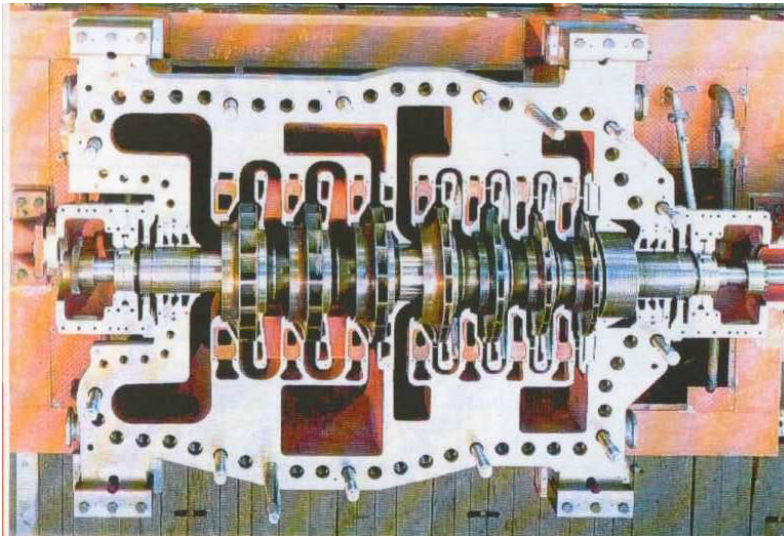


Рисунок 5.3 – Загальний вигляд нижньої половини корпусу з ротором

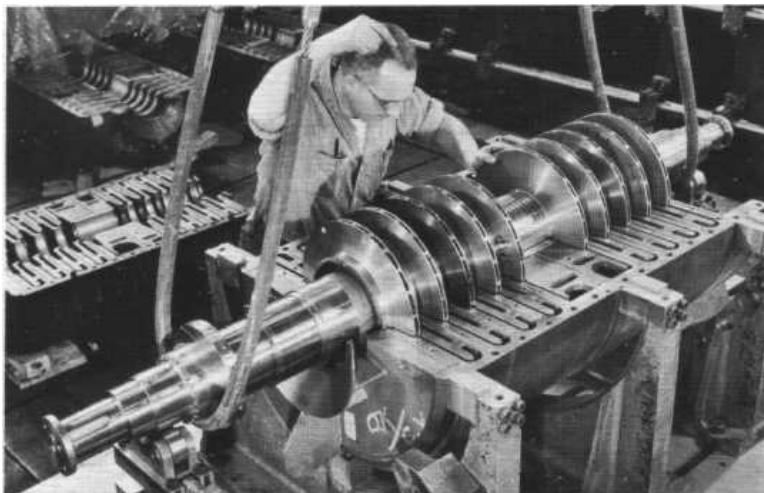


Рисунок 5.4 - Монтаж ротора у внутрішньому корпусі

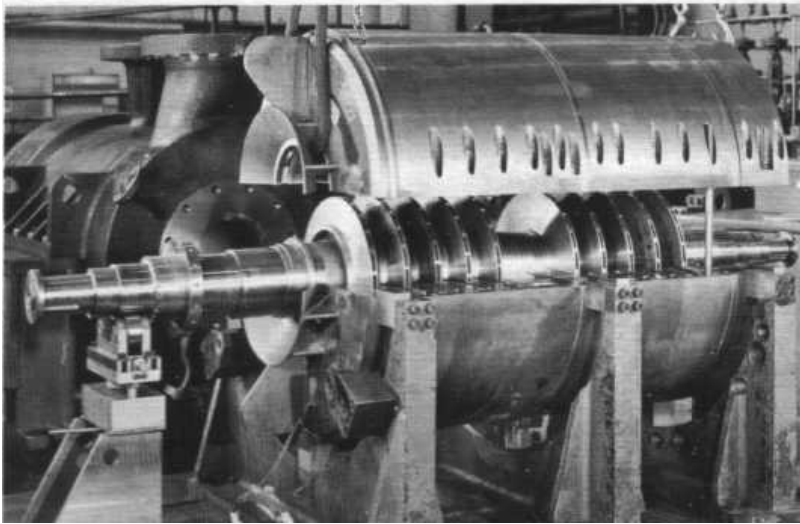


Рисунок 5.5 - Монтаж верхньої половини корпусу

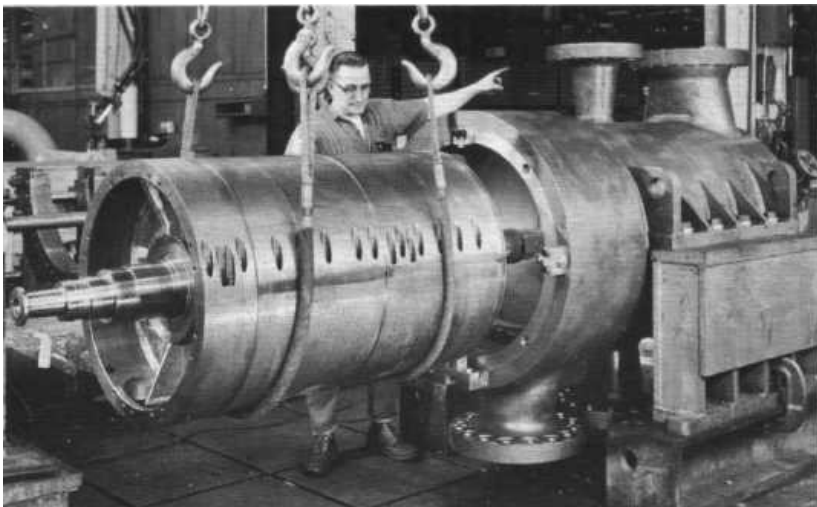


Рисунок 5.6 - Монтаж внутрішнього корпусу

## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

Внутрішній корпус вставляється у зовнішній (рис. 5.6), при цьому тимчасові опори видаляються.

Для того щоб не допустити ушкоджень робочих коліс під час установки верхньої половини корпусу, у нижню половину корпусу встановлюються по діагоналі дві напрямні колони. Висота колон вибирається так, щоб вони не дозволяли корпусу дотикатися до робочих коліс. Колони загвинчуються в отвори, виконані у фланці нижньої половини корпусу, і після установки верхньої половини корпусу видаляються.

У деяких дво - і триступневих компресорах без горизонтального рознімання та без внутрішнього корпусу зворотні напрямні апарати мають іншу конструкцію. Особливість конструкції ЗНА в таких машинах визначається тим, що ротор можна установити тільки з торця.

Монтаж ротора у корпусі типу «барель» показаний на рисунку 5.7.

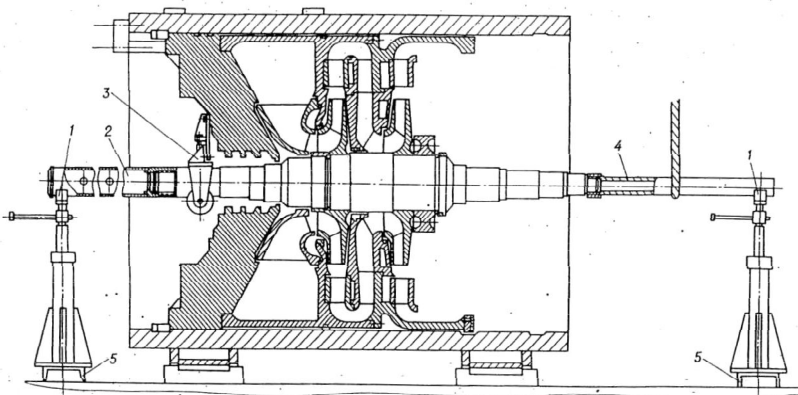


Рисунок 5.7 - Монтаж ротора у корпусі

ЗНА виконується з кільцевим розніманням, при цьому зовнішня частина ЗНА виконується суцільною, а внутрішня частина виконується із двох половин (рис. 5.8).

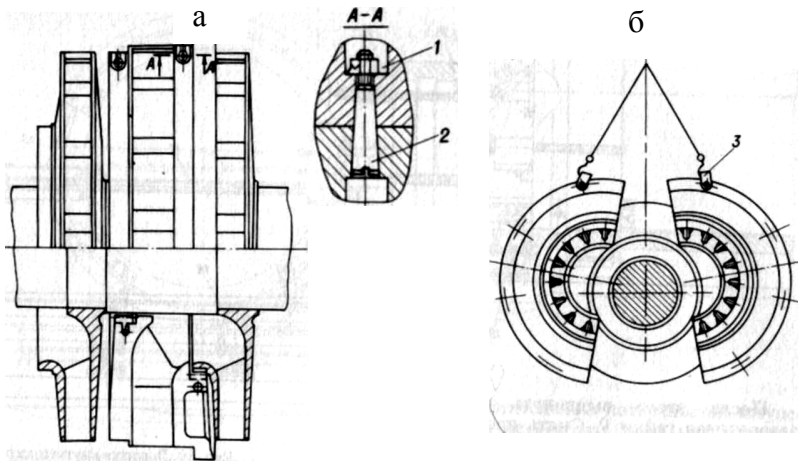


Рисунок 5.8 - Внутрішня частина зворотного напрямного апарата

а) – поздовжній розріз; б) – вигляд внутрішньої частини зворотного напрямного апарата вздовж осі

На рисунку 5.8 показане з'єднання двох половин внутрішньої частини ЗНА за допомогою конічних болтів 2 і гайок 1. Для виконання монтажу (демонтажу) внутрішньої частини на ЗНА встановлюються дві серги 3.

Діаметр кільцевого рознімання береться трохи більшим за зовнішній діаметр робочого колеса. Половини внутрішньої частини ЗНА встановлюються на роторі і скріплюються за допомогою болтів.

## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

Внутрішня частина зворотного напрямного апарата центрується відносно ротора за допомогою спеціальних пристроїв.

Після установки ротора в корпус внутрішня частина скріплюється болтами із зовнішньою частиною ЗНА. Центрування внутрішньої та зовнішньої частин ЗНА забезпечується за рахунок точності виготовлення посадкових поверхонь.

Проточна частина ЗНА формується декількома деталями. Зовнішня поверхня поворотного коліна, як правило, міститься безпосередньо в корпусі компресора (рис 5.9) або в одній із деталей внутрішнього корпусу (рис. 5.1, 5.2, 5.10).

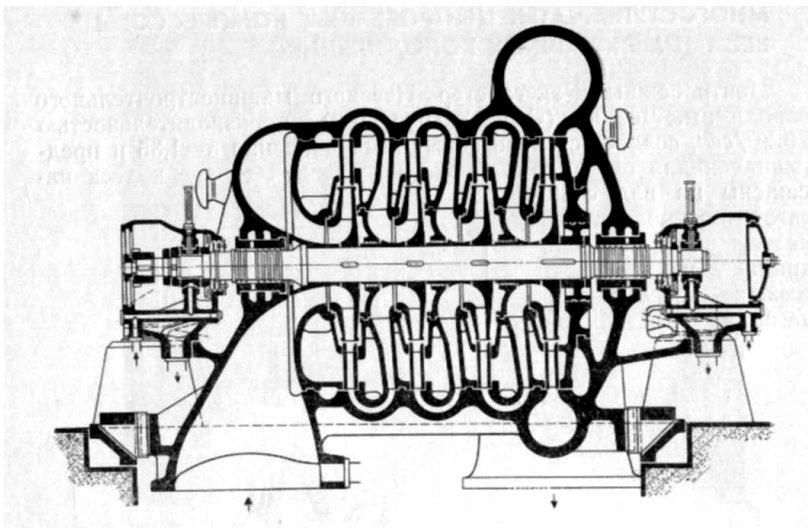


Рисунок 5.9 – Проточна частина відцентрового компресора фірми Зульцер

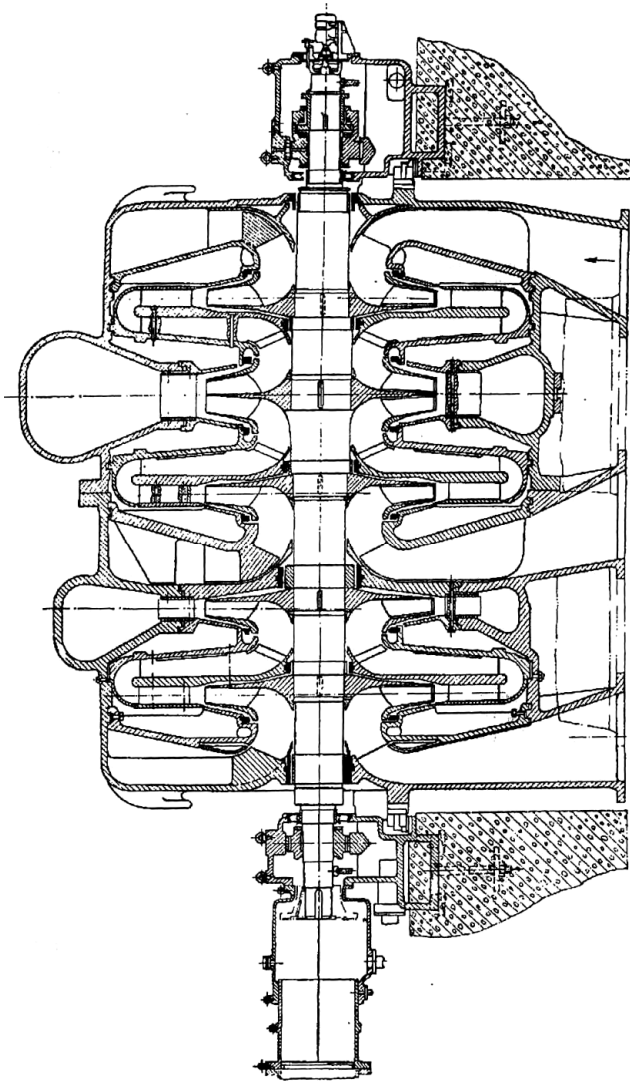


Рисунок 5.10 - Прогночна частина відцентрового компресора  
К 5500-41-1

Внутрішня поверхня поворотного коліна є поверхнею диска, на якому розміщені лопатки. У компресорах з більшими радіусами кривизни поворотних колін (рис. 5.1, 5.3, 5.9) внутрішні диски ЗНА для зменшення ваги виконують порожнистими.

Як правило, лопаткові решітки ЗНА виконуються збірними. При цьому внутрішній диск із лопатками з'єднується за допомогою болтів із діафрагмою, яка встановлюється у корпусі компресора по посадці Н7/е8. Така посадка дозволяє добре центрувати ці деталі.

Найчастіше лопатки ЗНА виконуються фрезерованими разом із диском. У деяких конструкціях компресорів використовуються суцільнолиті ЗНА. Собівартість суцільнолитих ЗНА є меншою порівняно з фрезерованими ЗНА, але вони мають більшу шорсткість поверхонь та меншу точність.

### **5.3 Монтаж елементів зворотних напрямних апаратів**

Розглянемо монтаж елементів зворотних напрямних апаратів на прикладі багатоступеневого відцентрового компресора для газоперекачувального агрегату (рис. 5.11). Компресор є односекційним семиступеневим з корпусом типу «барель».

Зворотні напрямні апарати входять до складу внутрішнього корпусу, креслення якого показане на рисунку 5.12. Внутрішній корпус містить нижню та верхню частини. Кожна частина утворюється з'єднанням половинок зворотних напрямних апаратів 3, 4, 5, 6, 7, 8 і 9 за допомогою шпильок 29 і гайок 32. Від розкручування гайки стопоряться шайбами 40.

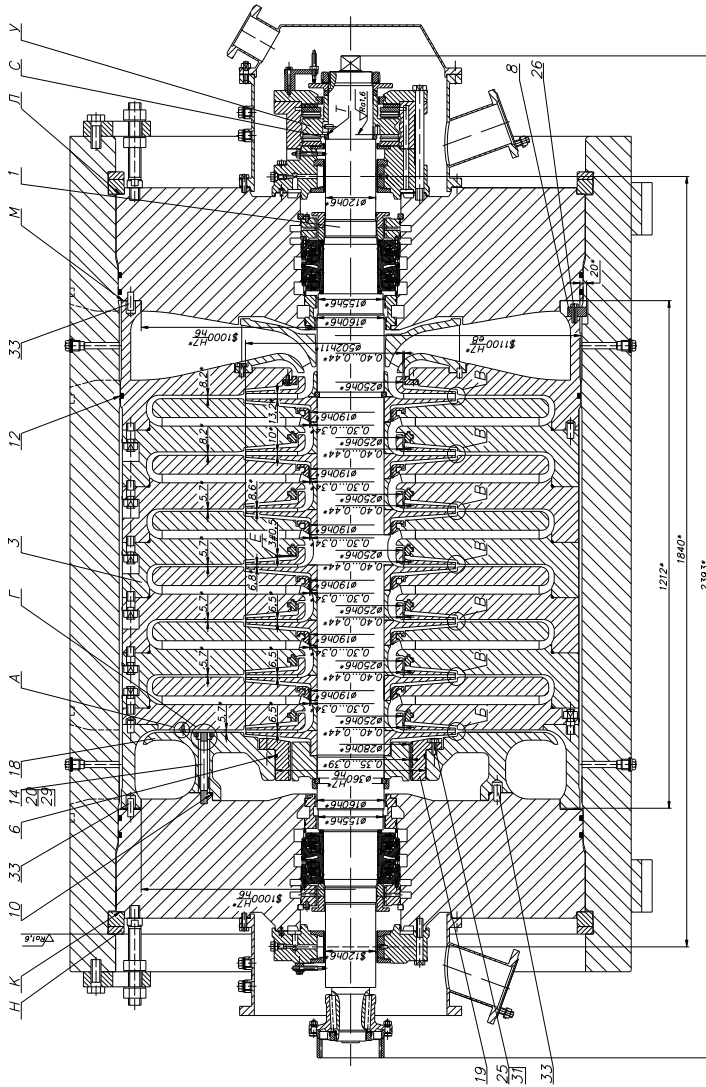


Рисунок 5.11 – Поздовжній розріз багатоступеневого відцентрового компресора:

- 1 – ротор; 3 – корпус внутрішній; 8 – шпонка; 10 – ущільнення; 12 – диск; 14 – шпилька;  
 18 – диск; 19 – лабиринтове ущільнення; 20 – гайка; 25, 26 – болти; 29, 31 – шайби; 33 – штифт



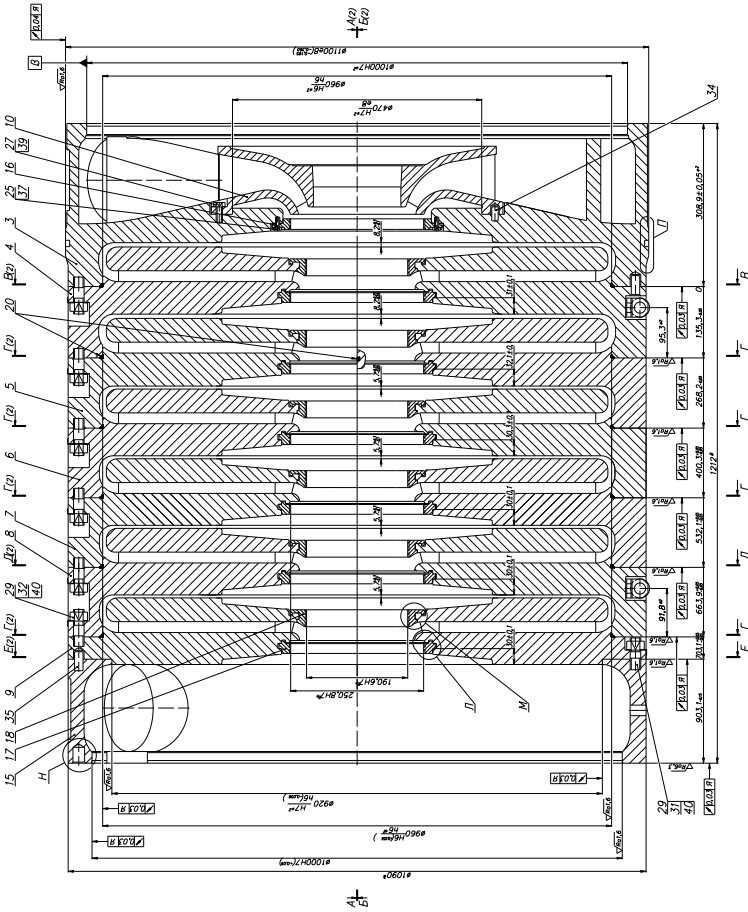


Рисунок 5.12 – Корпус внутрішній: 3,4,5,6,7,8,9 – діфрагми;  
 10 – апарат входний; 15 – камера вихідна; 16,17,18 – лабиринтові ущільнення;  
 20 – ущільнення; 25, 27 – болти; 29- шпилька; 31, 32 – гайки; 34, 35 – штифти;  
 37,39, 40 – шайби

## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

---

Для зменшення перетікання газу між діафрагмами встановлюються ущільнення 20 (рис. 5.12). Потрібно пам'ятати, що з'єднання половин внутрішнього корпусу виконується після установки ротора (див. рис. 5.5). Складання внутрішнього корпусу, яке показано на рисунку 5.12, є технологічним.

Вигляд на площину рознімання нижньої половини внутрішнього корпусу показаний на рисунку 5.13, а вигляд на площину рознімання верхньої половини внутрішнього корпусу - на рисунку 5.14.

Для ущільнення площини рознімання у нижніх половинах діафрагм і внутрішніх дисків виконані пази прямокутної форми перерізу, в які встановлюється гумовий шнур. На рисунку 5.13 ці місця позначені Р, Т, С.

Для зменшення внутрішніх перетікань газу в конструкції компресора передбачені лабіринтові ущільнення (на рисунку 5.12 – це деталі 16, 17 і 18). Лабіринтові ущільнення встановлюються в діафрагмах для зменшення перетікання газу у зазорі біля покривних дисків робочих коліс та у внутрішніх дисках для зменшення перетікання газу у зазорі між ступенями.

Розглянута конструкція компресора містить шість зворотних напрямних апаратів. На рисунку 5.15 наведений фрагмент креслення зворотного напрямного апарата у зібраному вигляді. ЗНА кожного ступеня складається з діафрагми 5 та внутрішнього диска з лопатками 1. Кожна з цих деталей складається із двох половин, які з'єднуються між собою у процесі виготовлення. Площина рознімання обробляється на початковій стадії виготовлення ЗНА, при цьому потрібно забезпечити високу точність обробки. Припустиме відхилення від площинності - 0,02 мм, тому прикінцевою обробкою площини рознімання є шліфування.

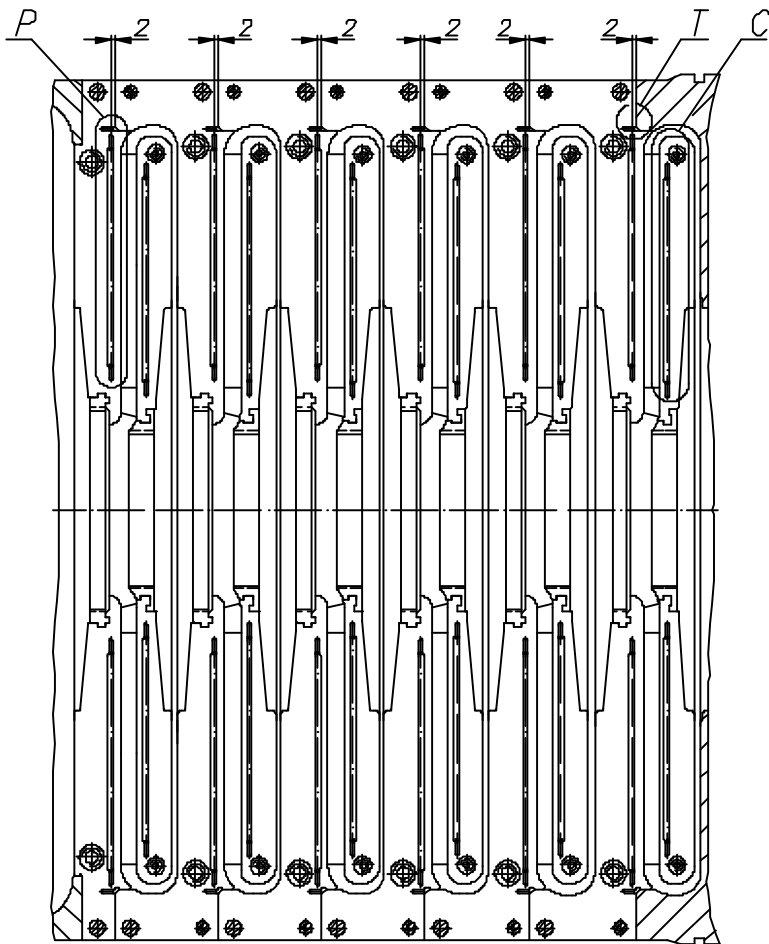


Рисунок 5.13 – Вигляд на площину розрізання нижньої половини внутрішнього корпусу

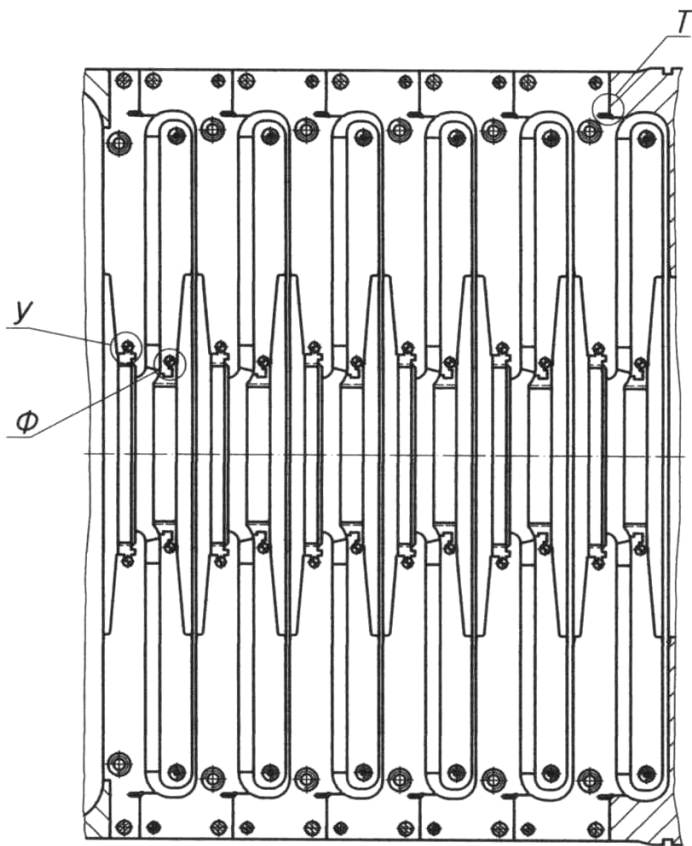


Рисунок 5.14 – Вигляд на площину рознімання верхньої половини внутрішнього корпусу

Подальша обробка діафрагми і внутрішнього диска виконується у зібраному стані.

На рисунку 5.16 наведений ще один фрагмент креслення зворотного напрямного апарата у зібраному вигляді - вигляд А (праворуч на рис. 5.15). На цьому кресленні показані отвори для центрування внутрішнього диска з діафрагмою і отвори для з'єднання ЗНА різних ступенів.

Для більш докладного зображення деталей та елементів конструкції, які забезпечують кріплення внутрішнього диска з діафрагмою, виконаний переріз С-С. Фрагмент креслення з перерізом С-С наведений на рисунку 5.18.

Для більш докладного зображення деталей та елементів конструкції, що забезпечують центрування внутрішнього диска з діафрагмою, виконаний переріз М-М. Фрагмент креслення з перерізом М-М наведений на рисунку 5.19.

На рисунку 5.17 наведений фрагмент креслення зворотного напрямного апарата у зібраному вигляді - вигляд Б (ліворуч на рис. 5.15).

Діафрагма та внутрішній диск з'єднуються між собою за допомогою шпильок і гайок. Центрування внутрішнього диска та діафрагми виконується за допомогою прецизійних штифтів.

Необхідно пам'ятати, що перед монтажем ротора верхні та нижні половини ЗНА роз'єднуються, інакше складання компресора унеможлиблюється. Нижні половини ЗНА різних ступенів з'єднуються і утворюють нижню половину внутрішнього корпусу. Верхні половини ЗНА різних ступенів утворюють верхню половину внутрішнього корпусу.

Після монтажу ротора половини внутрішнього корпусу з'єднуються (рис. 5.5).

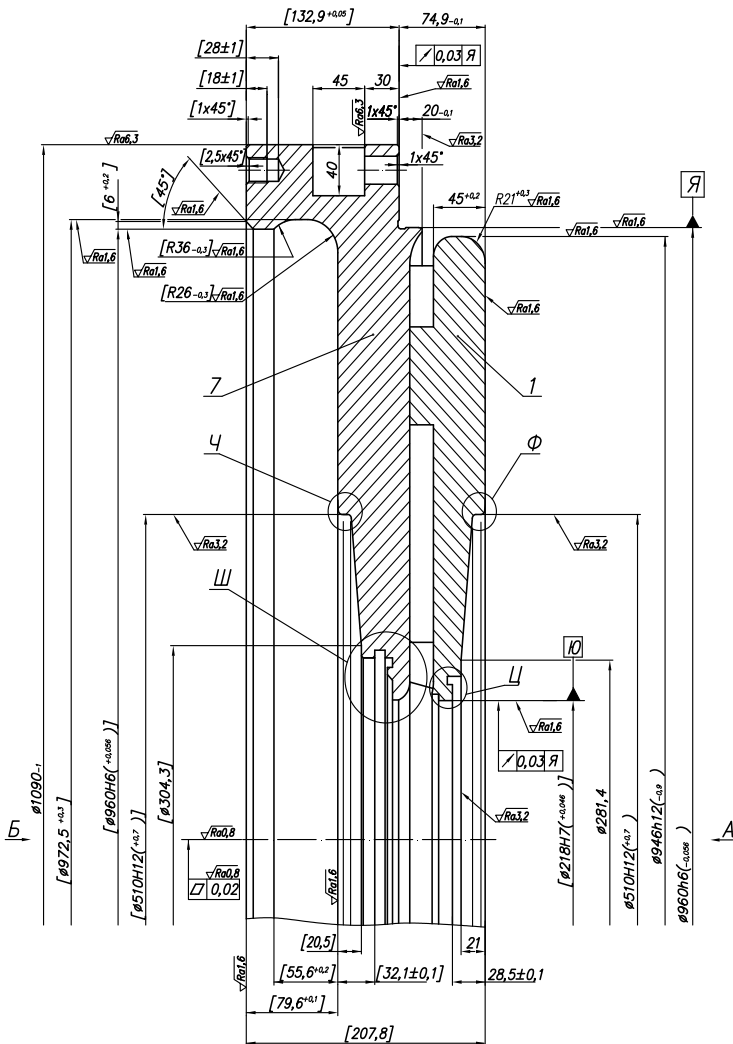


Рисунок 5.15 – Фрагмент креслення зворотного напрямного апарата у зібраному вигляді:  
1 - внутрішній диск; 5 – діафрагма







### 5.3.1 З'єднання внутрішнього диска з діафрагмою

Внутрішній диск з'єднується з діафрагмою за допомогою шпильок та гайок. Фрагмент креслення, на якому зображене таке з'єднання, наведений на рисунку 5.18. У внутрішньому диску виконані отвори, які проходять через лопатки ЗНА. Шпильки 6 закручуються в діафрагму, закріплення диска виконується за допомогою гайок 13. Від розкочування гайки фіксуються кернунням. Потім встановлюють заглушки 2, які заварюються.

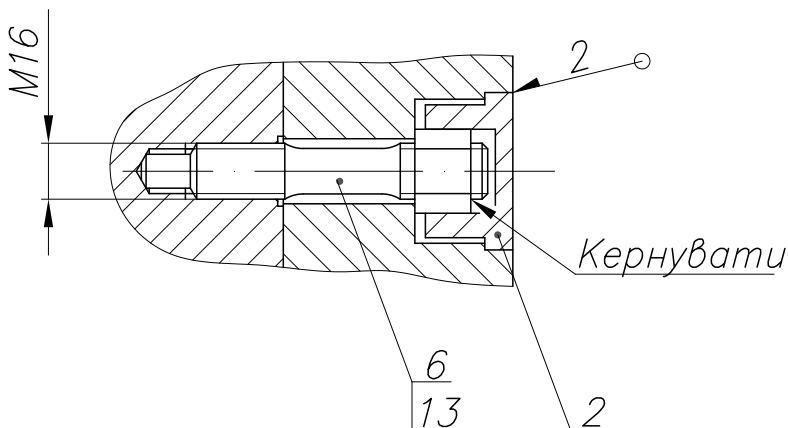


Рисунок 5.18 – Фрагмент креслення щодо кріплення внутрішнього диска з діафрагмою ЗНА:  
2 – заглушка; 6 – шпилька; 13 - гайка

Але таке з'єднання не забезпечує точного центрування внутрішнього диска і діафрагми.

Точне центрування внутрішнього диска та діафрагми необхідне для забезпечення рівномірного по колу зазора

## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

між гребенями міжступеневого ущільнення і поверхнею вала або між поверхнею покривного диска і гребенями відповідного ущільнення. Величина зазора в лабіринтових ущільненнях як правило, становить 0,3-0,5 мм. Тому потрібно забезпечити високоточне центрування всіх деталей у розмірному ланцюзі ротор - корпус.

Для високоточного центрування внутрішнього диска і діафрагми використовуються прецизійні штифти 7 (рис. 5.19). Штифти встановлюють у кількості 2 штук, посадковий розмір штифтів виконується за сьомим квалітетом точності.

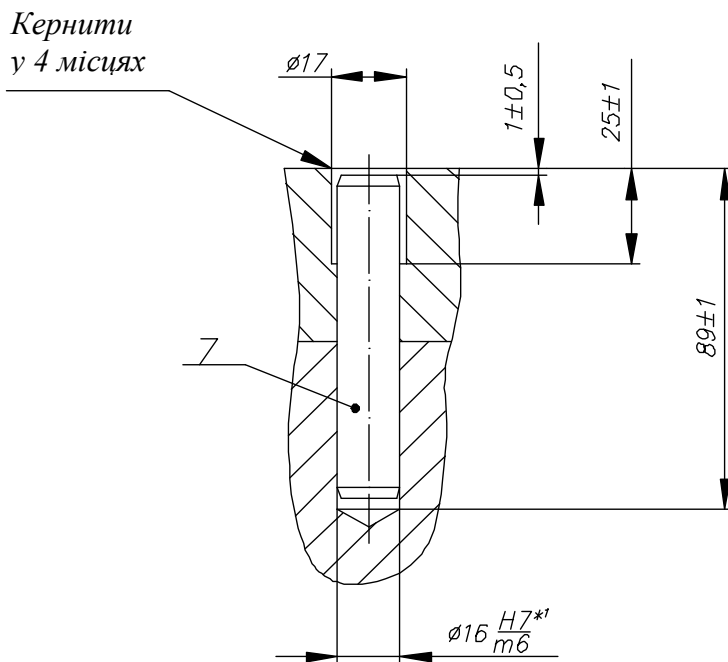


Рисунок 5.19 - Фрагмент креслення елементів конструкції для центрування диска і діафрагми ЗНА:

7- штифт

### 5.3.2 Складання зворотного напрямного апарата

Як зазначалося раніше, для здійснення складання компресора зворотні напрямні апарати виконуються з двох половин.

Креслення внутрішнього диска з лопатками наведені на рисунках 5.20 і 5.21, креслення діафрагми – на рисунках 5.22 і 5.23. Кожна з цих деталей складається із двох половин.

Кожна половина внутрішнього диска ЗНА містить дві деталі: диск з лопатками 1 та ребра 2. Лопатки у диску виконуються фрезуванням, потім до кожної другої лопатки приварюються ребра.

Кріплення половин виконується за допомогою болтів. Фрагмент креслення елементів конструкції для кріплення верхньої і нижньої половин діафрагми наведений на рисунку 5.24. Для запобігання розкручуванню болтів 11 встановлюються стопорні шайби 14.

Але болти 11 не забезпечують точного центрування половин ЗНА. Тому для центрування половин використовуються спеціальні прецизійні болти (рис. 5.25). Болти 3 встановлюються в отвори, які виконуються у верхній та нижній половинах діафрагми за сьомим квалітетом. Болти закріплюються за допомогою гайок 12, для попередження розкручування яких встановлюються стопорні шайби 14.

Прецизійні болти встановлюються на початковій стадії обробки ЗНА. Спочатку обробляється площа рознімання, а потім виконуються отвори для прецизійних і кріпильних болтів. Фрезування лопаток і розточування посадкових поверхонь у діафрагмі та диску ЗНА виконуються у зібраному стані. Прецизійні болти забезпечують збіг оброблених поверхонь в обох половинах при складанні і розніманні ЗНА.

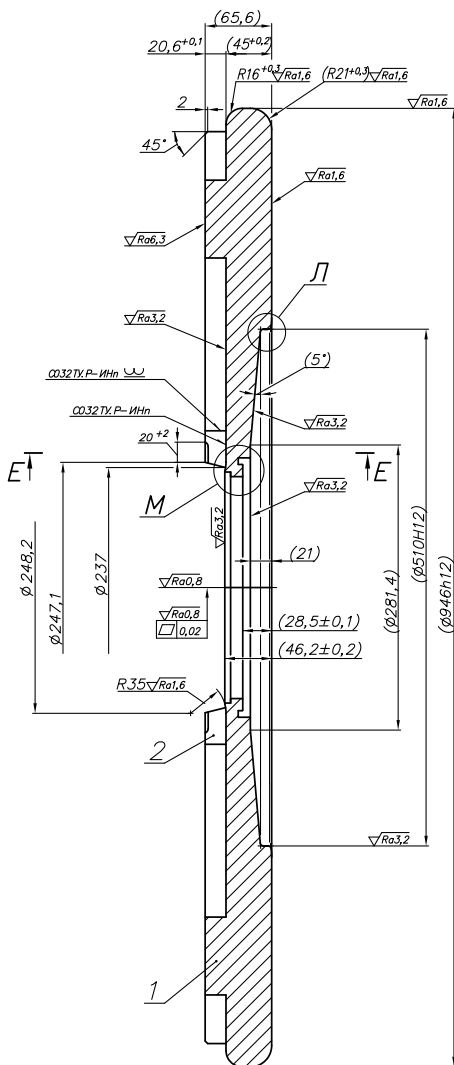


Рисунок 5.20 – Фрагмент креслення внутрішнього диска  
ЗНА:

1 – диск з лопатками; 2 - ребро



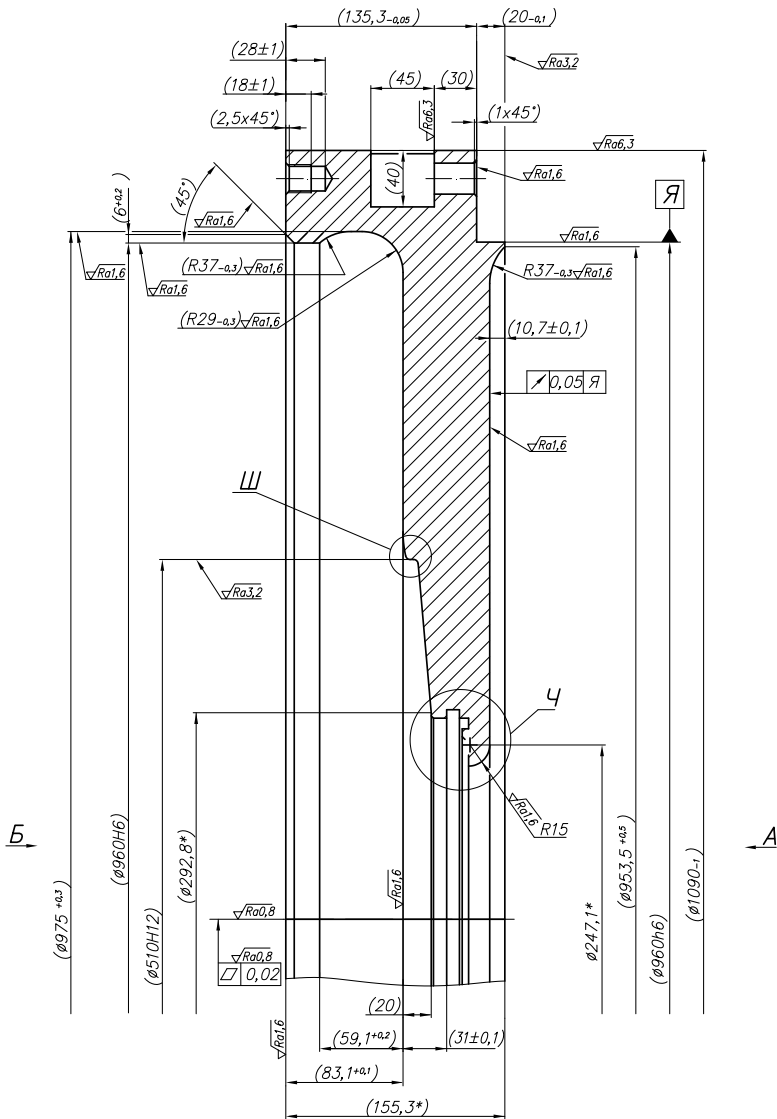


Рисунок 5.22 – Фрагмент креслення діафрагми

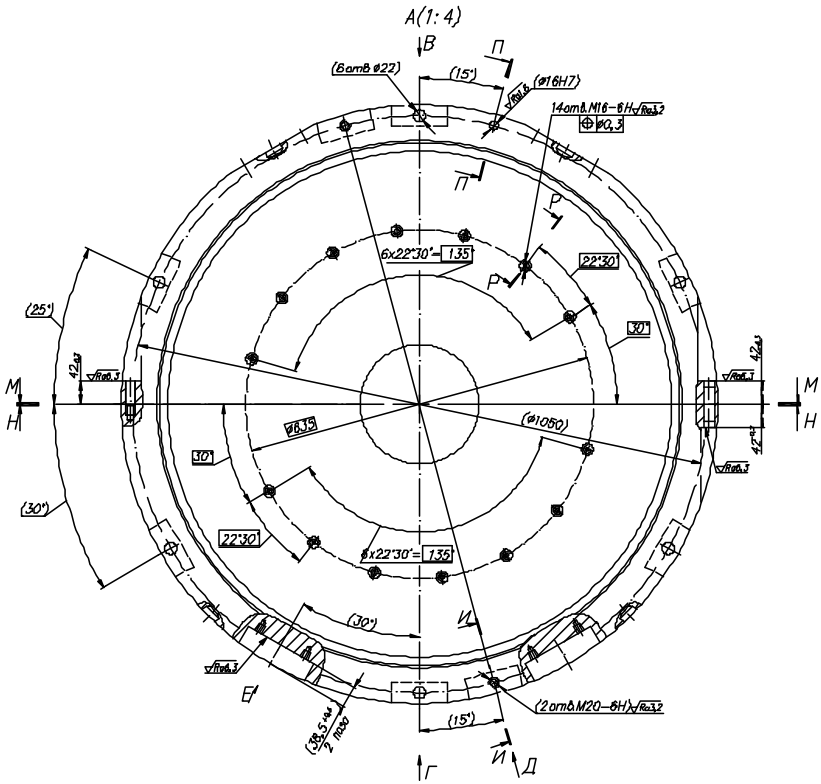


Рисунок 5.23 – Вигляд А (див. рис. 5.22) на діафрагму

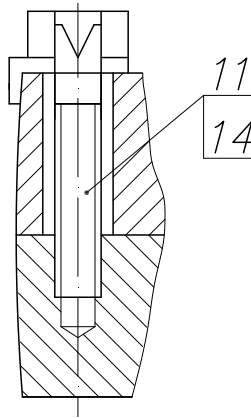


Рисунок 5.24 – Фрагмент креслення елементів конструкції для кріплення верхньої і нижньої половин діафрагм ЗНА:  
11 – болт; 14 - шайба

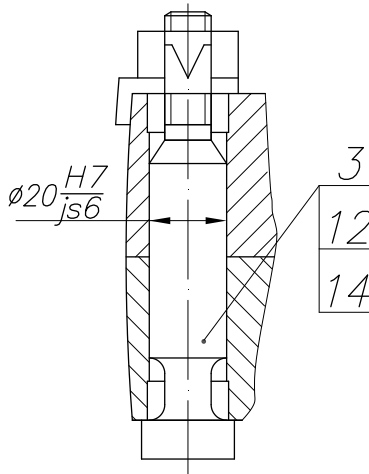


Рисунок 5.25 – Фрагмент креслення елементів конструкції для центрування верхньої і нижньої половин діафрагми:  
3 – болт прецизійний; 12 – гайка; 14-шайба



### 5.3.3 Лабіринтові ущільнення

Статичний тиск газу в проточній частині відцентрового компресора зростає від входу до виходу. Статичний тиск газу після робочого колеса більший за тиск перед робочим колесом  $p_2 > p_0$ . Статичний тиск газу після ЗНА є більшим за тиск після робочого колеса  $p_6 > p_2$ . Тому для зменшення перетікання газу в компресорі устанавлюються лабіринтові ущільнення: ущільнення на покривному диску робочого колеса і міжступеневе ущільнення.

На рисунку 5.26 показаний фрагмент креслення відцентрового компресора з лабіринтовими ущільненнями. На складальних кресленнях гребені лабіринтових ущільнень показуються умовно штриховою лінією.

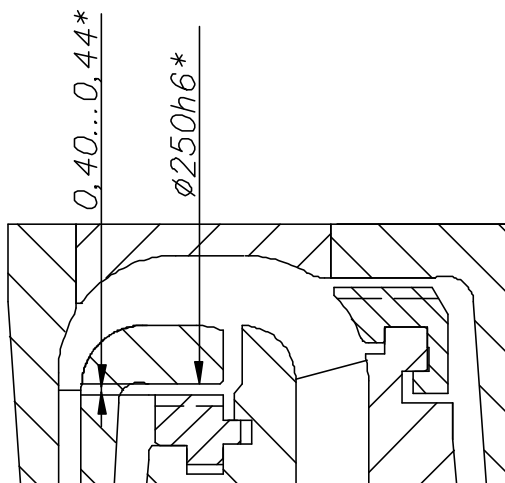


Рисунок 5.26 – Фрагмент проточної частини відцентрового компресора

Величина зазора між гребенями ущільнень та поверхнею покривного диска або поверхнею вала вибирається такою, щоб при роботі компресора не було дотикання деталей ротора і статора. З урахуванням прогину та коливань ротора величина зазора, як правило, дорівнює 0,4-0,5 мм.

Креслення лабіринтових ущільнень покривних дисків робочих коліс показано на рисунках 5.27 і 5.29, а креслення міжступеневого лабіринтового ущільнення - на рисунку 5.28.

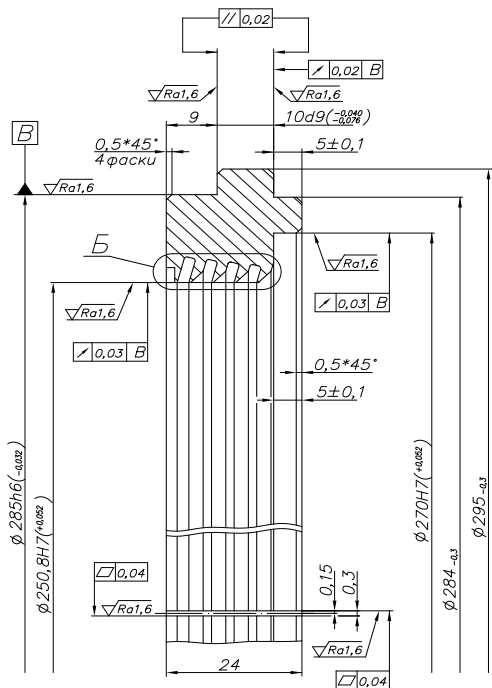
Ущільнення виготовляється у вигляді двох півкілець, кожне з яких установлюється за центруючою посадкою (H7/e7, H7/h6) у відповідну половину внутрішнього диска і діафрагми. Фрагменти конструкцій внутрішнього диска і діафрагми для установки лабіринтових ущільнень показані на рисунках 5.30 і 5.31.

Півкілець закріплюються у диску з торця (рис 5.29) або за допомогою замкового з'єднання спеціальної форми (рис. 5.26).

Конструкції лабіринтових ущільнень із замковим з'єднанням наведені на рисунках 5.27 і 5.28. Посадковою поверхнею для лабіринтового ущільнення покривного диска є діаметр  $\varnothing 285$ , а для міжступеневого лабіринтового ущільнення -  $\varnothing 218$ .

Наведене на рисунку 5.27 лабіринтове ущільнення покривного диска має виступи, які відповідають пазам у діафрагмі (рис. 5.30). Навпаки наведене на рисунку 5.28 міжступенево лабіринтове ущільнення виконане з пазами, а відповідні виступи виконані у внутрішньому диску ЗНА.

При торцевому кріпленні півкілець використовуються болти, які обов'язково фіксуються від розкручування за допомогою стопорних шайб.



Б(4:1)

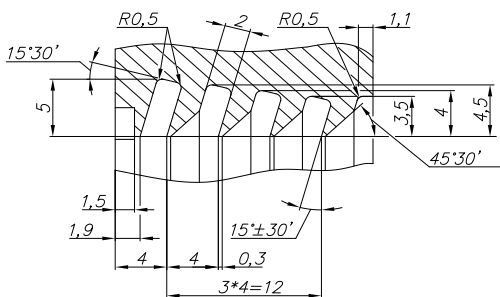


Рисунок 5.27 – Фрагмент креслення лабіринтового ущільнення покривного диска робочого колеса:  
фрагмент Б – збільшене креслення гребенів ущільнення

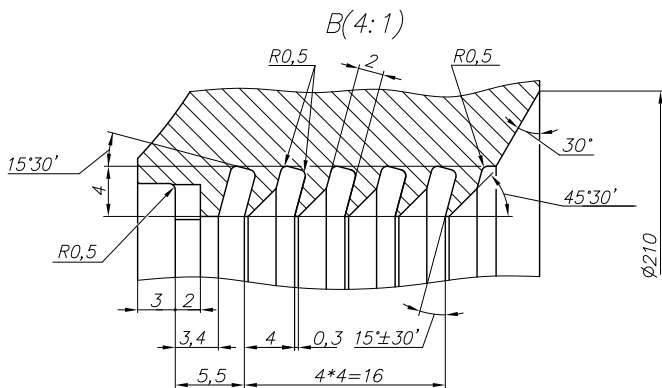
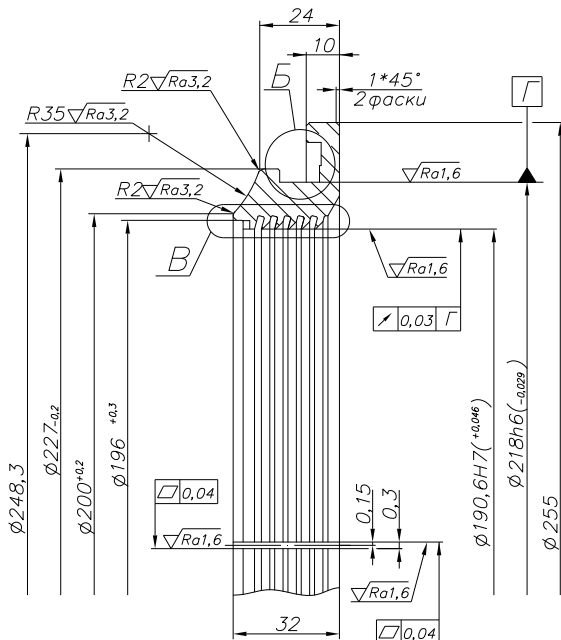


Рисунок 5.28 – Фрагмент креслення міжступеневого лабіринтового ущільнення:  
фрагмент В – збільшене креслення гребенів ущільнення

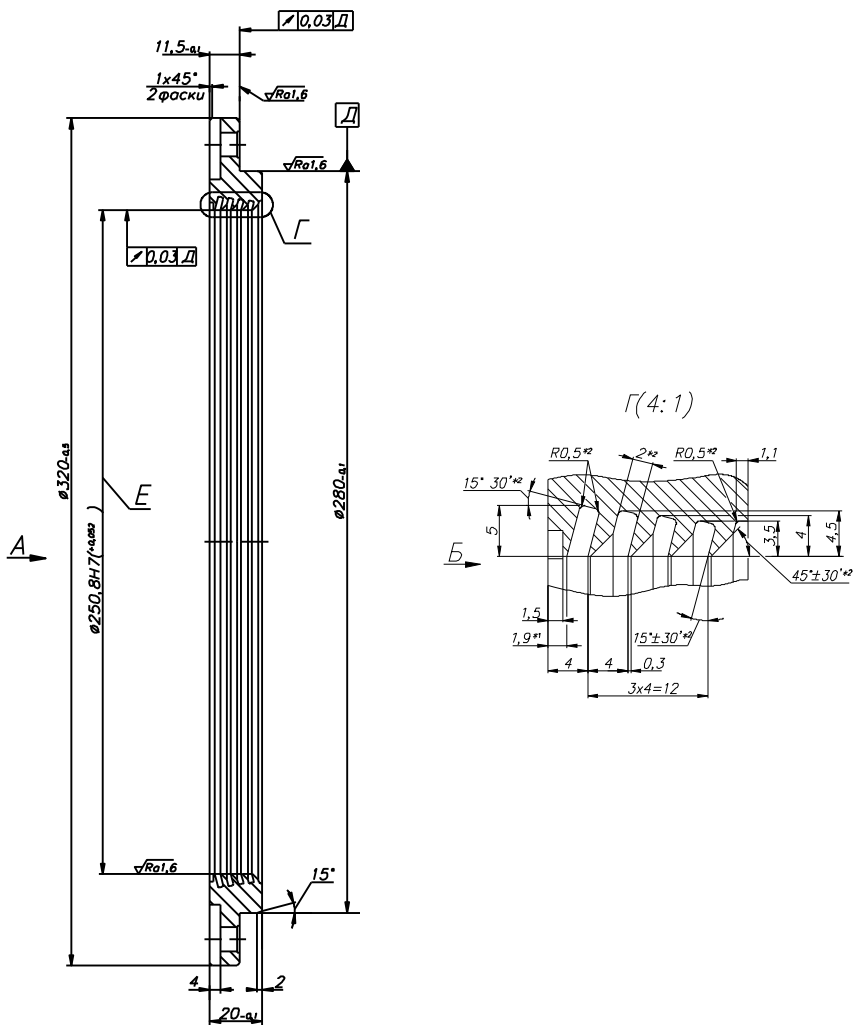


Рисунок 5.29 – Фрагмент креслення лабіринтового ущільнення покривного диска робочого колеса 1-го ступеня: фрагмент Г – збільшене креслення гребенів ущільнення

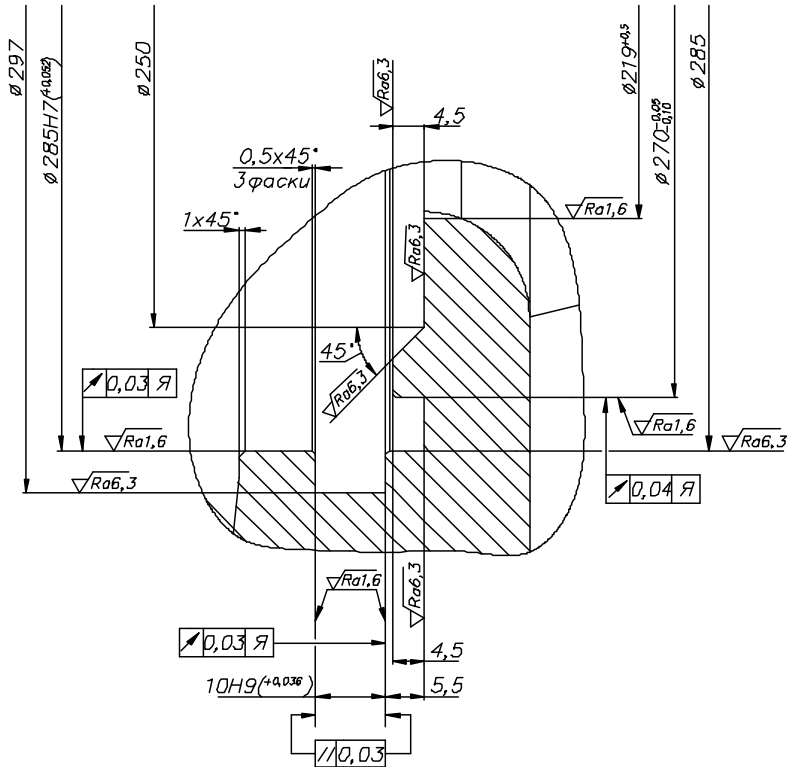


Рисунок 5.30 – Фрагмент конструкції діафрагми для встановлення лабіринтового ущільнення

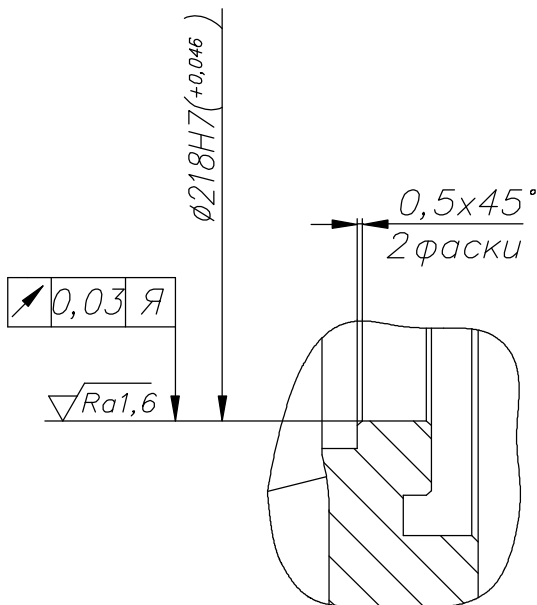


Рисунок 5.31 – Фрагмент конструкції внутрішнього диска для встановлення лабіринтового ущільнення

При використанні замкового з'єднання потреба у болтах і шайбах зникає. При такій конструкції півкільця закручуються в пази диска та закріплюються у площині рознімання (рис. 5.14).

Кріплення півкільць виконується гвинтами врівень із площиною рознімання. На рисунку 5.32 а наведений вигляд на гвинт, за допомогою якого виконується кріплення лабіринтового ущільнення покривного диска робочого колеса (місце У на рис. 5.14). На рисунку 5.32 б наведений вигляд на гвинт, за допомогою якого виконується кріплення міжступеневого лабіринтового ущільнення (місце Ф на рис. 5.14).

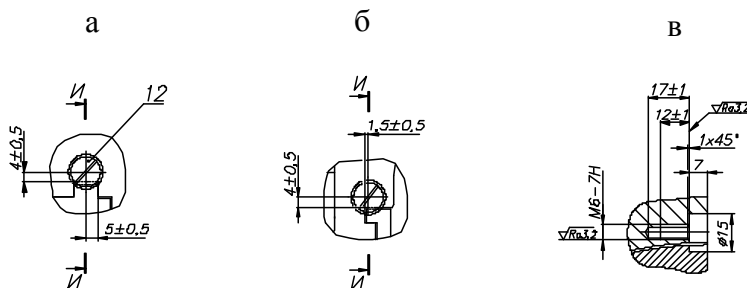


Рисунок 5.32 – Фрагмент креслення елементів конструкції для кріплення півкілець ущільнень у площині рознімання

Поздовжній переріз гвинта для кріплення півкілець наведений на рис. 5.32 в.

Матеріалами лабіринтових ущільнень є латунь, алюмінієві сплави або інші матеріали, які при стиканні з ротором не ушкоджують його поверхню.

#### 5.4 Побудова проточної частини зворотного напрямного апарата

Проточна частина зворотного напрямного апарата виконується на основі розрахованих значень геометричних параметрів зворотного напрямного апарата (додаток Б). Розміри, необхідні для виконання креслення проточної частини, показані на рисунках 1.2 і 1.9.

Більша частина цих розмірів визначається при виконанні розрахунків. Це  $b_4$  - ширина на виході з дифузора;  $D_4$  - діаметр на виході з дифузора;  $b_5$  - ширина на вході в лопаткову решітку;  $D_5$  - діаметр на вході в лопаткову решітку.



## 5 КОНСТРУЮВАННЯ ЗВОРОТНОГО НАПРЯМНОГО АПАРАТА

тку;  $b_6$  - ширина на виході з лопаткової решітки;  $D_6$  - діаметр на виході з лопаткової решітки;  $r_{нк}$  - внутрішній радіус поворотного коліна;  $r_к$  - зовнішній радіус кільцевого коліна на виході ЗНА;  $D_0$  - діаметр покривного диска на вході в робоче колесо наступного ступеня;  $d_0$  - діаметр втулки на вході в робоче колесо наступного ступеня;  $R_n$  - радіус лопатки;  $R_c$  - радіус кола центрів радіусів лопаток;  $z_6$  - кількість лопаток.

Зовнішній радіус поворотного коліна  $R_{нк}$  визначається за формулою

$$R_{нк} = r_{нк} + \frac{b_4 + b_5}{2}. \quad (5.1)$$

Якщо поворотне коліно проектується з периферійним контуром, виконаним не за дугою кола (див. рис. 1.6), то розмір  $e$  можна взяти з діапазону значень  $\frac{e}{b_4} = 1,4 - 1,6$  [8].

Для вибору радіуса кільцевого коліна  $R_к$  можна використовувати формулу

$$R_к = 0,95 \cdot \frac{D_6 - d_0}{2}. \quad (5.2)$$

Ці геометричні параметри дозволяють виконати креслення меридіонального перерізу проточної частини зворотного напрямного апарата.

### 5.4.1 Побудова профілю лопатки

Профіль лопатки можна визначити, користуючись результатами розрахунків.

В обраному масштабі накреслюються середня лінія лопатки і дуги кіл з радіусами  $Rt$ . Потім від точки перетину середньої лінії з дугами кіл в обидва боки відкладаються відповідні значення половини товщини лопатки  $\delta_u / 2$ .

Значення товщини лопатки  $\delta_u$  визначаються за формулою 3.1.

Накреслюються радіуси вхідної та вихідної кромки лопатки.

Використовуючи отримані точки, виконується побудова опуклої і увігнутої ліній профілю, наприклад, з використанням кубічних сплайнів.

На рисунку 5.33 показаний профіль лопатки ЗНА, побудований за даними таблиці додатка Б.

Деякі проектантні відцентрових компресорів виконують профіль лопатки ЗНА з використанням декількох дуг кіл.

На рисунку 5.34 показаний профіль лопатки ЗНА, побудований за допомогою декількох дуг кіл. Значення радіусів  $R_1, R_2, \dots, R_{10}$  у міліметрах наведені у таблиці у другому рядку. У цій таблиці наведені також координати центрів радіусів  $x, y$  у міліметрах. Координати  $x, y$  - це абсциса та ордината прямокутної системи координат, центр якої міститься у точці  $O$ .

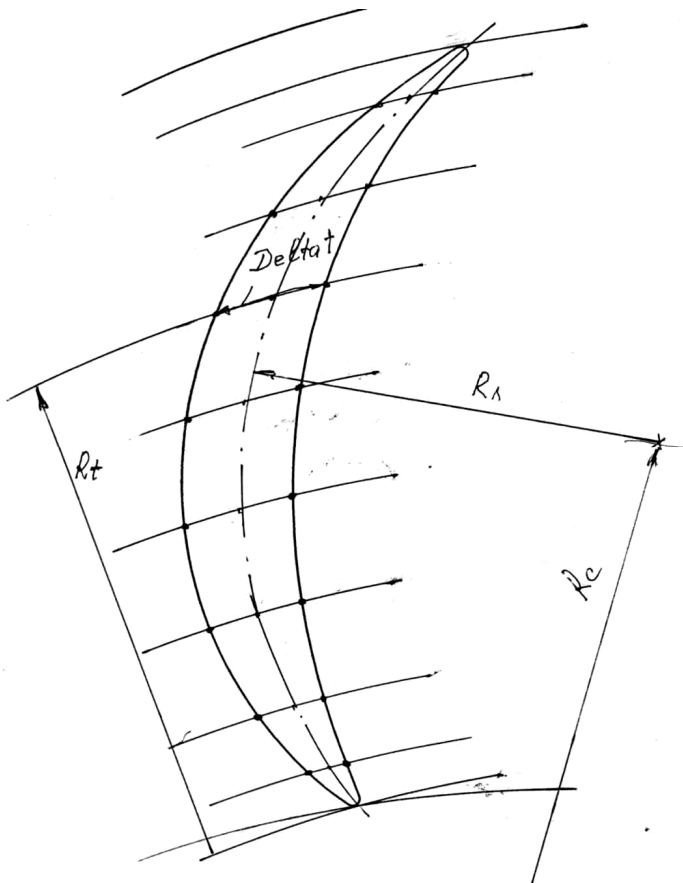
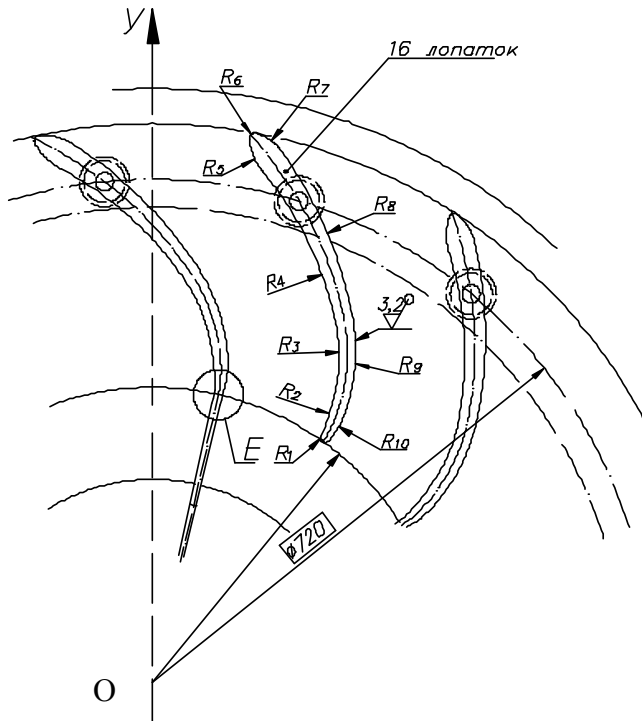


Рисунок 5.33 – Приклад побудови профілю за даними файлу *RetC.rez*



		$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$R_5$	$R_6$	$R_7$	$R_8$	$R_9$	$R_{10}$
		3	214	115	248	47	4	37	300	136	68
Координати центра радіуса	X	723,9645	-77,7227	18,9135	-111,4631	115,8419	73,2054	63,2009	-151,0730	9,7814	74,6424
	Y	174,4385	254,5088	233,0043	206,7185	394,7542	389,1747	357,7278	205,2296	237,1962	216,7745

Рисунок 5.34 – Фрагмент креслення профілю, утвореного дугами кіл

### 5.5 Вибір матеріалу та способу виготовлення заготовки

Оскільки навантаження елементів ЗНА є незначним, то для його виготовлення не потрібно використовувати матеріали з високою міцністю. Можна використовувати чавуни марок СЧ 18, СЧ 20, СЧ24 або конструкційні сталі марок сталь 20, сталь 30.

Під час вибору матеріалу для ЗНА потрібно враховувати властивості газу, який стискається.

У випадку, коли робочим середовищем є агресивні гази, використовуються корозійностійкі або кислотостійкі матеріали.

Заготовки для ЗНА із чавунів виконуються литими. Виливку отримують литтям у земляну форму. У виливки видаляється ливникова система та ливарні добавки, потім виконується дробоструминне або піскоструминне очищення виливки.

Для зняття внутрішніх напружень виконується штучне або природне старіння. Для виявлення внутрішніх дефектів, таких, як тріщини або раковини, виконується ультразвукова дефектоскопія. Заготовкою для ЗНА зі сталі є поковка або прокат.

Поковка розрізається на дві половини дисковою фрезою, обробляється площина рознімання, а потім половини з'єднуються. Далі обробка диска та діафрагми виконується у зібраному стані.

Лопатки виконуються спільно з диском фрезуванням або приварюються до диска. Після зварювання для зняття напружень виконується відпуск.

### 5.6 Вимоги до механічної обробки зворотного напрямного апарата

Технічні вимоги для виготовлення ЗНА зазначаються на робочих кресленнях деталей. Основними вимогами є:

- забезпечення точності розмірів, які визначають геометрію проточної частини;
- забезпечення низької шорсткості вибраних поверхонь;
- забезпечення точності посадкових розмірів;
- забезпечення щільного прилягання половин ЗНА;
- забезпечення збігу сполучених розмірів у половинах ЗНА.

Допуски на відхилення розмірів є такими:

- відхилення профілю лопаток від теоретичного не повинно перевищувати 0,1 мм;
- зсув лопаток за кроком від номінального положення не повинен перевищувати 0,5 мм;
- зсув осей лопаток від номінального положення (розворот) не має перевищувати 0,5 мм;
- шорсткість поверхонь, які утворюють проточну частину,  $Ra\ 1,6 - 3,2$ ;
- точність посадкових розмірів повинна бути не нижчою за точність за сьомим квалітетом.

Відхилення від точності циліндричної форми посадкових поверхонь допускається не більшою за половину допуску на розмір.

Посадкова поверхня в діафрагмі дорівнює  $\varnothing 960\ h6$  (рис. 5.22). Штифти для з'єднання диска і діафрагми встановлюються за посадкою  $16\ H7 / m6$  (рис. 5.18). Прецизійні болти для з'єднання половин ЗНА встановлюються за посадкою  $\varnothing 20\ H7 / js6$  (рис. 5.25).

Посадкові розміри для установки ущільнень дорівнюють  $\varnothing 285 H7$  (рис. 5.30) і  $\varnothing 218 H7$  (рис. 5.31).

Відхилення від площинності площин рознімання не повинно перевищувати 0,05 мм. Щуп товщиною 0,05 мм не повинен проходити на глибину більше ніж 20 мм.

### **5.7 Виконання креслень ЗНА за допомогою CAD - технологій**

Графічна частина курсового проекту відцентрового компресора складається з поздовжнього розрізу, поперечного розрізу і робочого креслення деталі. Приклади креслень поздовжнього та поперечного розрізів відцентрового компресора наведені на рисунках В.1 і В.2. На рисунку В.3 показане креслення зворотного напрямного апарата.

Під час виконання дипломного проекту відцентрового компресора, як правило, виконується складальне креслення компресора (2-3 аркуші формату А1) і 5-6 креслень формату А1 основних вузлів і деталей, зокрема ЗНА. Приклад складального креслення компресора показаний на рисунках В.4 і В.5.

На рисунках В.6 і В.7 показані креслення двох різних конструкцій зворотних напрямних апаратів. На рисунках В.8 і В.9 показані креслення деталей зварного диска, наведеного на рисунку В.7.

Невеликі розміри наведених креслень не дають якісного розрізнення деяких фрагментів конструкцій, позначень та написів.

Під час виконання дипломних та курсових проектів можна використовувати електронні версії креслень, наведених у посібнику.

### Питання для самоконтролю

1. Яким є призначення зворотного напрямного апарата?
2. На скільки змінюється напрямок руху газу у меридіональній площині ЗНА?
3. Що означає назва типу корпусу - «барель»?
4. З якою метою виконується ЗНА з кільцевим розніманням, коли зовнішня частина ЗНА є суцільною, а внутрішня частина виконується із двох половин?
5. Які конструктивні елементи забезпечують зменшення перетікання газу між діафрагмами?
6. Які вимоги висувають до площини рознімання ЗНА?
7. Які конструктивні елементи забезпечують зменшення внутрішніх перетікань газу в конструкції компресора?
8. Як забезпечується центрування половин ЗНА?
9. Для чого використовують прецизійні болти?
10. Дайте опис конструкції лабіринтового ущільнення.
11. Якою, як правило, встановлюють величину зазору між гребенями ущільнень і поверхнею покривного диска або поверхнею вала?
12. Дайте опис конструкції лабіринтового ущільнення із торцевим типом кріплення.
13. Дайте опис конструкції лабіринтового ущільнення із замковим типом кріплення.
14. Як виконується побудова проточної частини зворотного напрямного апарата?
15. Які вимоги висувають до механічної обробки при виготовленні ЗНА?
16. Які матеріали використовують для виготовлення ЗНА?
17. Яка термообробка виконується при виготовленні ЗНА?



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРИ

1. Ден Г.Н. Механика потока в центробежных компрессорах.- Л.: Машиностроение, 1973.- 272 с.
2. Теория и расчет турбокомпрессоров/ К.П. Селезнев, Ю.Б. Галеркин, С.А. Анисимов и др. - Л.: Машиностроение, 1986.- 392 с.
3. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры.- Л.: Машиностроение, 1982.- 271 с.
4. Шерстюк А.Н. Компрессоры.- М.,Л.: ГОСЭНЕРГО-ИЗДАТ, 1959.- 191 с.
5. Руководство по курсовому и дипломному проектированию по холодильным и компрессорным машинам/ Г.А. Поспелов и др.- М.: Машиностроение, 1986.- 264с.
6. Коршунов А.В., Стрижак Л.Я., Кулаков С.Ю. Методика проектирования и оценка эффективности обратно-направляющих аппаратов малорасходных ступеней центробежных компрессоров высокого давления // Компрессорная техника и пневматика. – 2006. - №1. - С. 16-20.
7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969.- 824 с.
8. Галеркин Ю.Б., Боровков А.И., Воинов И.Б., Гаев А.В., Гамбургер Д.М., Софронова А.А., Лозовая Н.С. Результаты расчета вязкого потока в неподвижных элементах центробежных компрессорных ступеней с помощью программной системы ANSYS/CFX // Компрессорная техника и пневматика. – 2007. - №2. - С. 10-16.
9. Калашников А.Н., Калинин Н.В. К вопросу о проектировании обратно-направляющих аппаратов центробежных компрессоров // Вестник НТУУ «КПИ». Машиностроение. – 2002. - Вып. 42, Т.2. - С. 158-160.

10. Калашников А.Н., Калинкевич Н.В. Расчет неизоэнтальпийного течения газа в обратно-направляющих аппаратах центробежных компрессоров // Вісник Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля: У 2 ч. – 2007. - №3(109). Ч. 1. - С. 109-113.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров.- М.: Наука, 1970. -720 с.
12. Калинкевич Н.В., Бобров А.Н., Калашников А.Н. Повышение экономичности центробежных компрессоров за счет улучшения газодинамических характеристик неподвижных элементов ступени // Вісник Сумського державного університету, Серія Технічні науки (Машинобудування). – 2002. -№9(42). - С. 34-39.
13. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1978.- 736 с.
14. Калінкевич М.В. Варіантний розрахунок відцентрового компресора: Навчальний посібник.-Суми: Вид-во СумДУ, 2008.-55 с.
15. Методичні вказівки до практичних занять, курсового і дипломного проектування «Термогазодинамічний розрахунок робочого колеса відцентрового компресора» з курсу “Проектування турбомашин ”/ Укладач М.В. Калінкевич. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008.-20 с.
16. Методичні вказівки до практичних занять , курсового та дипломного проектування «Розрахунок дифузорів відцентрового компресора» з курсу “Проектування турбомашин ”/ Укладач М.В. Калінкевич. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008.-23 с.

## Додаток А (довідковий)

### Порівняння результатів розрахунку параметрів потоку з експериментальними даними

На рисунку А.1 наведені розподіли відносних швидкостей по ширині поворотного коліна на вході. Наведено експериментальні дані і чотири розрахункових розподіли швидкостей, які отримані за різних умов розрахунку.

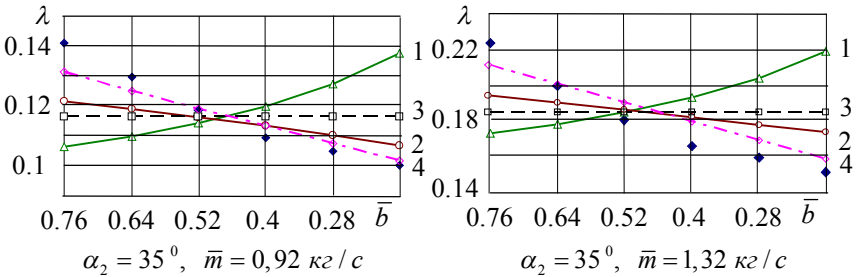


Рисунок А.1 – Розподіл відносних швидкостей на вході у ПК:

- 1 – без урахування нерівномірності потоку; 2 - за моделлю лінійного закону нерівномірності повного тиску;
- 3 - відповідно до методики розрахунку за [1];
- 4 - за моделлю нелінійної нерівномірності повного тиску ;
- ◆ - експеримент

Розрахунок параметрів потоку, виконаний при заданому рівномірному розподілі швидкостей і тисків на вході в поворотне коліно (крива 1), дає результати, які навіть якісно не узгоджуються з експериментальними даними. Криві 2 і 4 на цьому рисунку побудовані за результатами розрахунку течії газу з урахуванням нерівномірності повного тиску на вході у поворотне коліно. Крива 2 отримана за моделлю лінійного закону

зміни повного тиску по ширині каналу. У цьому випадку забезпечується якісне узгодження розрахункових та експериментальних даних. Розрахункові значення відносних швидкостей потоку (крива 4), отримані за моделлю нелінійної нерівномірності повного тиску на вході в ПК, дають кількісне узгодження з відповідними експериментальними значеннями швидкостей. При розрахунку швидкостей згідно з [4] значення швидкості по ширині каналу (лінія 3) є сталим.

На рисунку А.2 показані значення відносних швидкостей уздовж периферійної поверхні поворотного коліна, отримані розрахунковим та експериментальним способами. Розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними є незначною, і у середньому становить приблизно 4%.

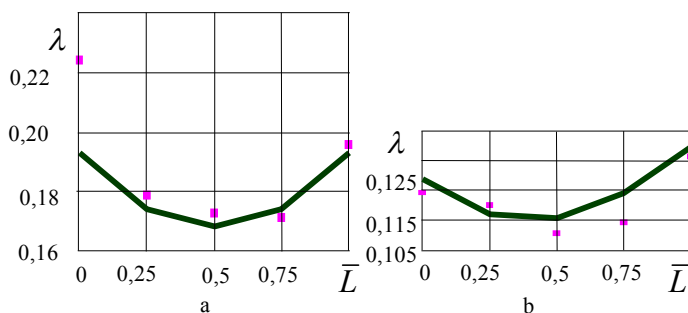


Рисунок А.2 - Розподіл відносних швидкостей уздовж периферійної поверхні поворотного коліна

a -  $\bar{m} = 1,46 \text{ м/с}$  ; b -  $\bar{m} = 0,83 \text{ м/с}$

- експеримент; — - теорія

На рисунку А.3 показані розподіли швидкостей у лопаткової решітці.

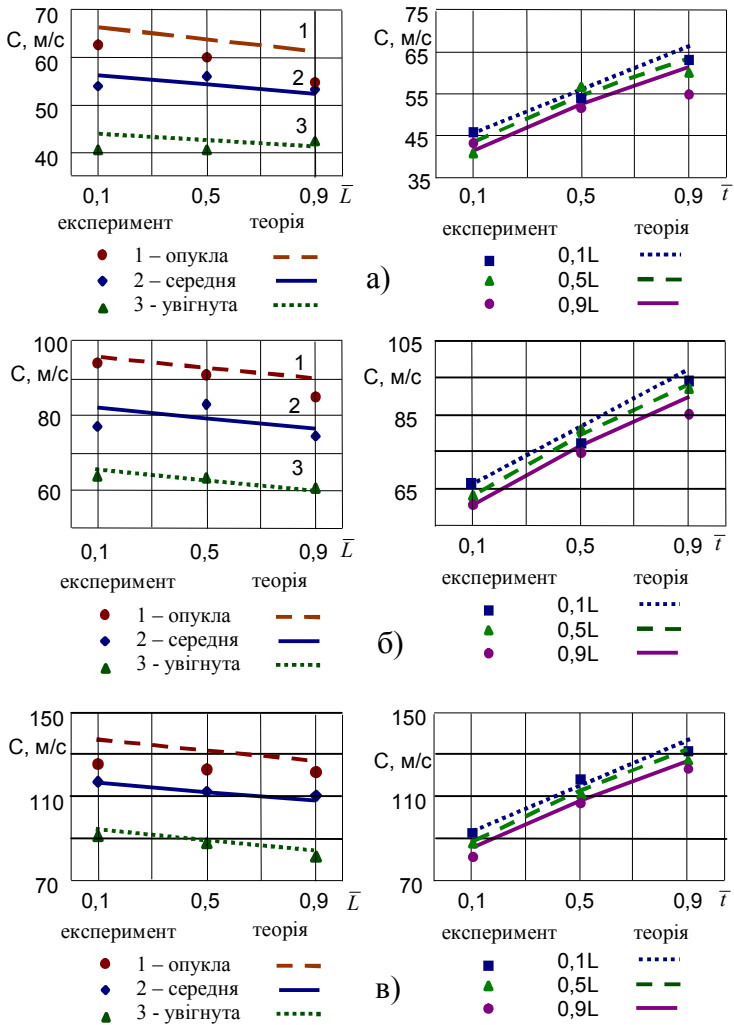


Рисунок А.3 - Розподіли швидкостей потоку по довжині та за кроком лопаткової решітки для режиму  $\alpha_2=35^0$ :

а)  $\bar{m} = 0,92 \text{ кг/с}$  ; б)  $\bar{m} = 1,32 \text{ кг/с}$  ; в)  $\bar{m} = 1,8 \text{ кг/с}$

При всіх витратах газу наявне добре узгодження розрахункових та експериментальних значень для швидкостей на увігнутій поверхні лопаток і для середньовитратних швидкостей. На опуклій поверхні лопаток розрахункові значення швидкостей перевищують експериментальні на 3-5%.

Експериментальні та розрахункові значення швидкостей за кроком решітки добре узгоджуються на вході і у середній частині решітки. На виході з лопаткової решітки експериментальні та розрахункові значення швидкостей значно відрізняються, що найімовірніше, пов'язано з підвищеною похибкою вимірювань у цьому перерізі.

Порівняння розрахункових та експериментальних даних за структурою потоку в поворотних колінах і в лопаткових решітках підтверджує адекватність математичної та комп'ютерної моделей дійсним термогазодинамічним процесам течії газу в ЗНА.

# Додаток Б (довідковий)

## Приклад файлу результатів розрахунку ЗНА RetC.rez

### РАСЧЕТ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ	
Наружный диаметр рабочих колес	D2 = 0.6500 м
Диаметр входа в лопаточную решетку ОНА	D5 = 1.0500 м
Диаметр покрывн. диска РК след. ступ.	D0 = 0.3400 м
Диаметр втулки РК следующей ступени	Dvt = 0.2000 м
Ширина канала на выходе из диффузора	B4 = 0.0350 м
Толщина лопаток ОНА	Delta6 = 0.0060 м
Абсолютная скорость на выходе из РК	C2 = 200.00 м/с
Абсолютная скорость на выходе из диффузора	C4 = 100.00 м/с
Угол потока на выходе из диффузора	Alfa4 = 20.00 град
Угол отставания потока в ОНА	DAlfa6 = 2.00 град
Оптимальное значение густоты решетки в ОНА	L/t = 2.10
Температура газа на входе в компрессор	Tn = 295.00 К
Температура газа на выходе из РК	T2 = 310.00 К
Теплоемкость при постоянном давлении	Cp = 2430.0 Дж/(кг.К)
Плотность газа на входе в компрессор	Ron = 20.00 кг/м3
Кoeffициент сжимаемости газа	zn = 0.9500
Газовая постоянная	R = 507.00 Дж/(кг.К)
Газодинамическая функция	Sigma = 3.4000
Эмпирический коэффициент	Ku = 1.300
Эмпирический коэффициент	Ktr = 1.350
Эмпирический коэффициент	Kf = 1.050
Отн. радиус кривизны простр.траектории потока	Rok/B4 = 14.0

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА	
Ширина канала на входе в лоп. решетку ОНА	B5 = 0.0455 м
Ширина канала на выходе из лоп. решетки ОНА	B6 = 0.0526 м
Диаметр на выходе из лопаточной решетки ОНА	D6 = 0.3874 м
Скорость на входе в лопаточную решетку ОНА	C5 = 74.41 м/с
Скорости на выходе из лопаточной решетки ОНА	C6 = 60.86 м/с
Угол потока на входе в лоп. решетку ОНА	Alfa5 = 1186.31 град
Угол лопатки на входе	Alfa15 = 21.00 град
Угол лопатки на выходе	Alfa16 = 92.00 град
Наружный радиус выходного колена	Rk = 0.0237 м
Количество лопаток ОНА	Z6 = 11
Плотность газа на входе в лоп. решетку ОНА	Ro5 = 23.78 кг/м3
Плотность газа на выходе из лоп. решетки ОНА	Ro6 = 23.85 кг/м3
Температура газа на входе в лоп. решетку ОНА	T5 = 317.09 К
Температура газа на вых. из лоп. решетки ОНА	T6 = 317.47 К
Давление газа на входе в лоп. решетку ОНА	P5 = 3.633 МПа
Давление газа на выходе из лоп. решетки ОНА	P6 = 3.647 МПа
Кoeffициент стеснения потока на входе в ОНА	Tau5 = 0.961
Кoeff. стеснения потока на выходе из ОНА	Tau6 = 0.973
Площадь проходного сечения на входе в ОНА	F5 = 0.05169 м2
Площадь проходного сечения на выходе из ОНА	F6 = 0.06233 м2
Радиус средней линии лопатки ОНА	Rl = 0.2429 м
Радиус окружности центров радиусов лопаток	Rc = 0.3107 м
Внутренний радиус поворотного колена	Rnk = 0.0391 м

	Ort		Rt		Bt		Alfalt		F		Deltat		Deltau	
	-		м		м		град		м2		м		м	
	0.95		0.508		0.046		26.53		0.0522		0.0262		0.0587	
	0.90		0.492		0.046		31.19		0.0527		0.0417		0.0806	
	0.75		0.442		0.047		42.65		0.0543		0.0666		0.0983	
	0.60		0.392		0.048		52.33		0.0559		0.0723		0.0913	
	0.50		0.359		0.049		58.35		0.0570		0.0691		0.0812	
	0.40		0.326		0.050		64.23		0.0581		0.0618		0.0686	
	0.25		0.277		0.051		73.15		0.0597		0.0445		0.0465	
	0.10		0.227		0.052		82.74		0.0613		0.0213		0.0214	
	0.05		0.210		0.052		86.24		0.0618		0.0124		0.0124	

# Додаток В (довідковий) Приклади креслень

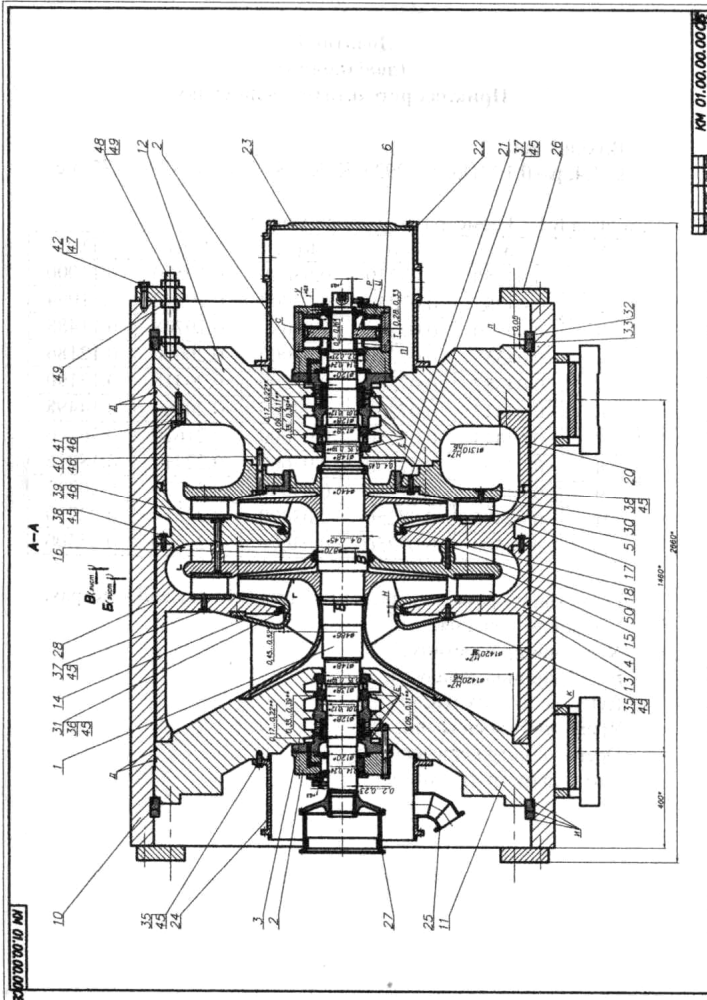


Рисунок В.1 – Поздовжній розріз відцентрового компресора



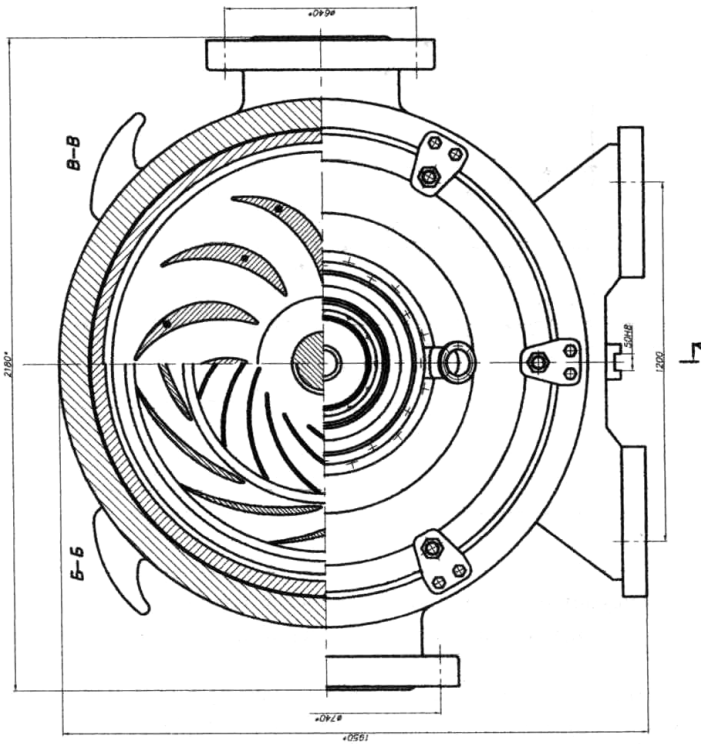


Рисунок В.2 – Поперечний переріз відцентрового компресора



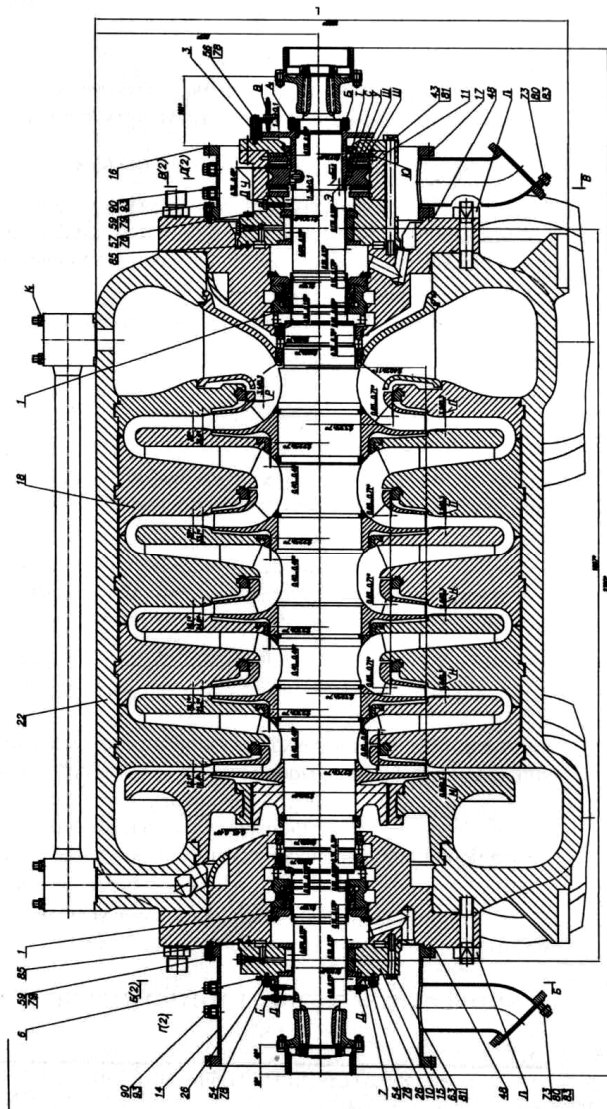


Рисунок В.4 — Поздовжній розріз п'ятиступеневого відцентрового компресора

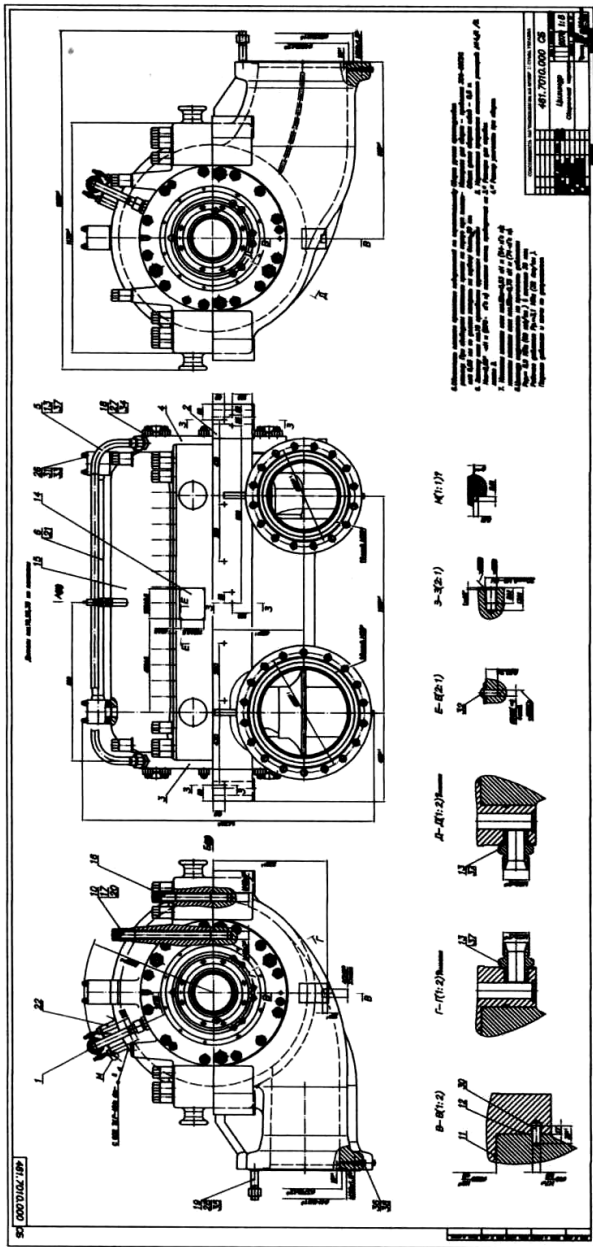


Рисунок В.5 – Зовнішній вигляд відцентрового компресора

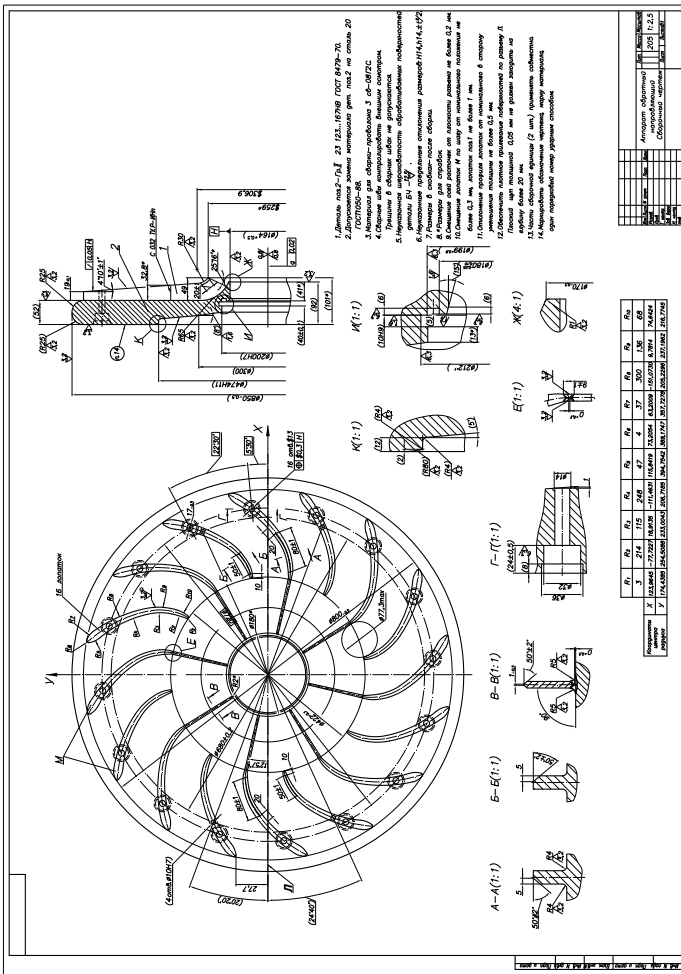


Рисунок В.6 – Кресления диска 3 лопатками









Навчальне видання

**Калінкевич** Микола Васильович,  
**Калашніков** Андрій Миколайович

**ЗВОРОТНІ  
НАПРЯМНІ АПАРАТИ  
ВІДЦЕНТРОВИХ КОМПРЕСОРИВ**

Навчальний посібник

Художнє оформлення обкладинки М.В. Калінкевича  
Редактор Н.В. Лисогуб  
Комп'ютерне верстання М.В. Калінкевича

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 7,44 . Обл. – вид. арк. . 5,18. Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач  
Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.