

Міністерство освіти і науки України
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра технічної теплофізики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

здобувача за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
за спеціальністю 142 «Енергетичне машинобудування»
освітньо-професійна програма «Компресори, пневмоагрегати
та вакуумна техніка»
на тему «Проектування осерадіальних каналів турбомашин»

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

Завідувач кафедри

С. М. Ванєєв

Керівник роботи

М.В. Калінкевич

Здобувач

В.Д. Сорін

Група

ХК-61/2 К

Суми 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	С. 3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПРОЕКТУВАННЯМ КРИВОЛІНІЙНИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КАНАЛІВ	5
2 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ОСЕРАДІАЛЬНИХ КАНАЛІВ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ	12
2.1 Розрахунок течії в осерадіальному осесиметричному каналі	12
2.2 Методика проектування меридіонального контура осерадіального каналу	22
2.2.1 Визначення осьової довжини каналу	24
2.2.2 Визначення параметрів середньої лінії меридіонального контура	24
2.2.3 Визначення координат серединної ортогоналі	28
2.2.4 Визначення параметрів втулкової і периферійної поверхонь каналу.....	32
2.2.5 Побудова ортогоналей до середньої лінії	37
2.2.6 Визначення радіусів кривини для втулкової і периферійної поверхонь	43
2.2.7 Визначення довжини середньої лінії і твірних втулкової і периферійної поверхонь	46
3 РОЗРАХУНОК ТЕЧІЇ В ОСЕРАДІАЛЬНИХ КАНАЛАХ	48
3.1 Програма для проектування осерадіальних	48
3.2 Вихідні дані	51
3.3 Результати розрахунків	52
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	56
4.1 Небезпечні і шкідливі фактори компресорного виробництва	56
ВИСНОВОК	58
Список використаної літератури	59

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Сорін В.Д.</i>			<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Калінкевич.</i>			2	70	
<i>Реценз.</i>					СумГУ ХК-61		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утверд.</i>							

**Проектування
осерадіальних**

ВСТУП

Проточна частина турбокомпресорів може бути представлена у вигляді послідовності каналів різного типу. Особлива увага повинна бути приділена осесиметричним криволінійним каналам, характер течії в яких впливає на ефективність роботи машини в цілому. Приклади таких каналів зображені на рис. 1 і 2.

Кривина каналів призводить до зміни структури розподілу параметрів потоку газу, що може призвести до виникнення зон несприятливої течії (наприклад, відриву потоку, застійним зонам). Тому на стадії проектування осесиметричних криволінійних каналів важливо дати оцінку течії з метою створення геометрії, що забезпечує мінімум втрат.

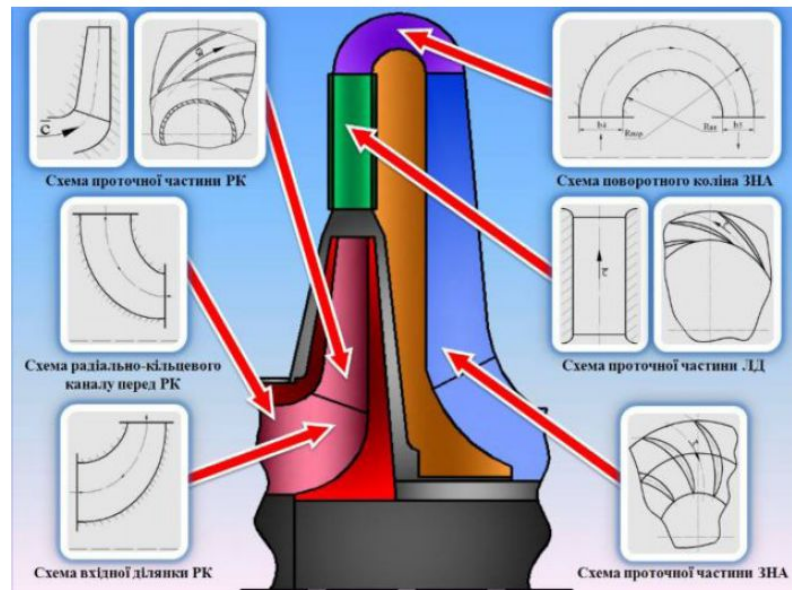


Рисунок 1 – Канали відцентрового компресора

Існує ряд комерційних програмних комплексів, що дозволяють розрахувати параметри течії в каналах турбомашин. Однак, завдання форми

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		3

меридіонального контуру є завданням конструктора і вимагає певних знань в області газодинаміки таких течій.

Тому має сенс використання більш простих програмних продуктів, в яких використовуються досить прості математичні моделі течій, засновані на строгих фізичних висновках про характер течії і легко пояснюють якісно суть процесу.

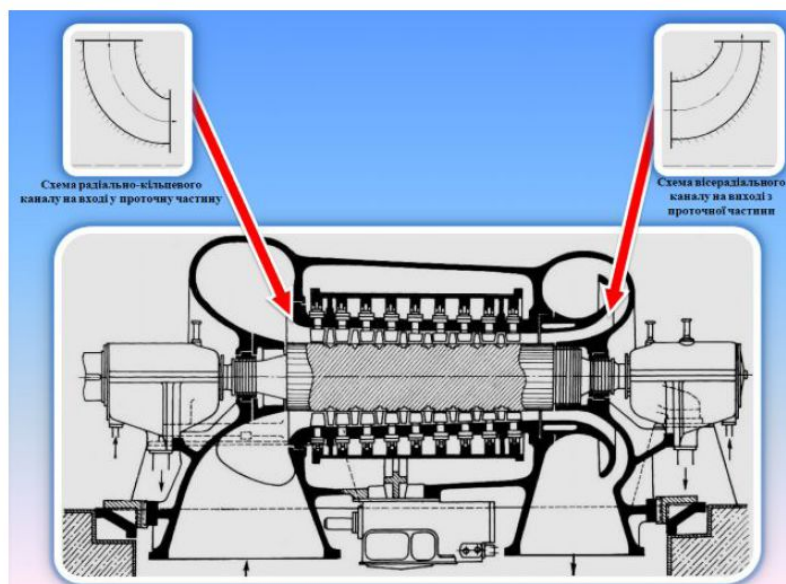


Рисунок 2 – Канали осьового компресора

Не дивлячись на геометричну простоту таких каналів, течія в них мало вивчена. Тому, в зв'язку з дорожнечою фізичного експерименту, числове дослідження є актуальною і невід'ємною частиною наукових досліджень.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ З ПРОЕКТУВАННЯМ КРИВОЛІНІЙНИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КАНАЛІВ

У турбокомпресорах зустрічаються випадки просторової осесиметричної течії газу з закруткою потоку c_u і без неї (рис.1.1).

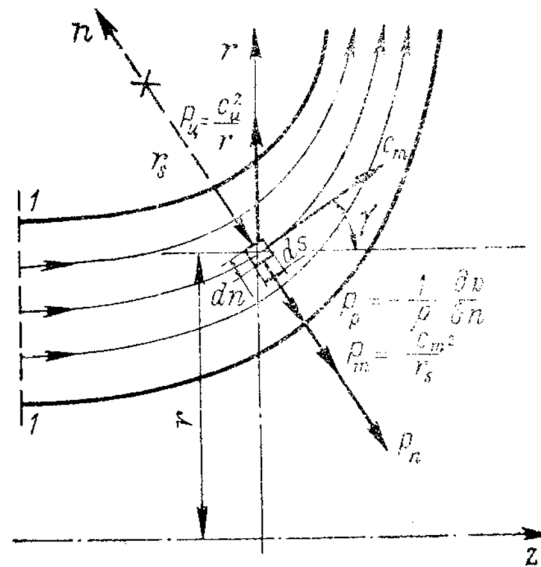


Рисунок 1.1 - Просторова осесиметрична течія газу в проточній частині турбомашини в меридіональному перерізі (сили віднесені до одиниці маси)

Для ідеального газу рівняння рівноваги уздовж нормалі до лінії течії n в меридіональній площині при нескінченному числі лопаток (або при $z \neq \infty$ і осередненні потоку по колу) має вигляд (з урахуванням різного напрямку осі n і радіуса кривини ліній течії $r_s < 0$) [1]

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = P_n + \frac{c_u^2}{r} \cos \gamma - \frac{c_m^2}{r_s}, \quad (1.1)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

де P_n - проекція на напрямок n сили P , Віднесеної до одиниці маси газу і визначається впливом лопаток на потік (пропорційна різниці тисків між передньою і задньою сторонами лопатки).

У рівнянні (1.1) похідна $\frac{\partial p}{\partial n}$ може бути записана як $\frac{dp}{dn}$, так як тиск покладається осередненим по колу.

Рівняння рівноваги в напрямку осі r має вигляд

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} = P_r + \frac{c_u^2}{r} - \frac{c_m^2}{r_s} \cos \gamma + c_m \frac{\partial c_m}{\partial s} \sin \gamma. \quad (1.2)$$

Рішення цих рівнянь для випадку осерадіального каналу без закрутки потоку представлено в розділі 2.

Деякі результати дослідження течії в U-образному осесиметричному каналі, що імітує форму проточної частини відцентрового компресора, наведені в [1,2]. Для такої течії характерно сильне прискорення у опуклою поверхні і велика нерівномірність меридіональної складової швидкості c_m поперек каналу. Розподіл меридіональних швидкостей на стінках каналу, отримане методом ЕГДА в зіставленні з вимірними швидкостями при статичній продувки, представлено на рис. 1.2.

Видно, що на опуклій поверхні каналу виникають зони відриву, в до відривній області результати вимірювань різними методами збігаються.

На рис. 1.3 показано поле швидкостей в'язкої течії, яке демонструє розміри і інтенсивність відривної зони. Коефіцієнт втрат, відповідний меридіональної течії в нерухомому каналі, виявився істотно залежним від

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
						6
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

інтенсивності відриву на опуклій поверхні, яка визначається місцевою дифузорністю нев'язкого потоку $\dot{c}_s = \frac{c_{\min}}{c_{\max}}$ на опуклій поверхні.

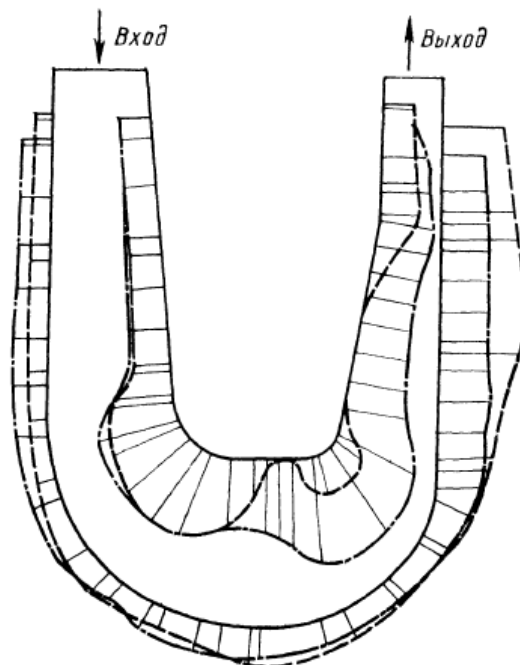


Рисунок 1.2 - Розподіл швидкостей на стінках U - образного осесиметричного каналу:

— — — статичні продувки; ——— метод СГДА

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

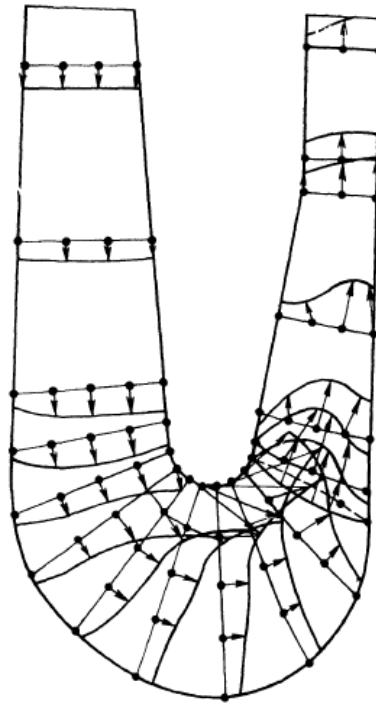


Рисунок 1.3 - Розподіл меридіональних швидкостей в'язкого потоку в осесиметричному U - образному каналі

Слід зазначити, що при $\dot{c}_s > 0,6$ відривні зони не виникали, а при значеннях $\dot{c}_s < 0,5$ відбувається різке збільшення втрат.

В [1, 2] також наводяться графіки меридіональних швидкостей вздовж поверхонь основних і покривних дисків для трьох варіантів коліс з різною формою покривного диска (рис. 1.4). Слід зазначити пік швидкості на опуклої (периферійної) поверхні в зоні повороту, величина якого залежить від кривини каналу. У нерухомих каналах такий пік швидкості може бути причиною відриву потоку. Це ще раз говорить про актуальність розвитку різних підходів до проектування каналів.

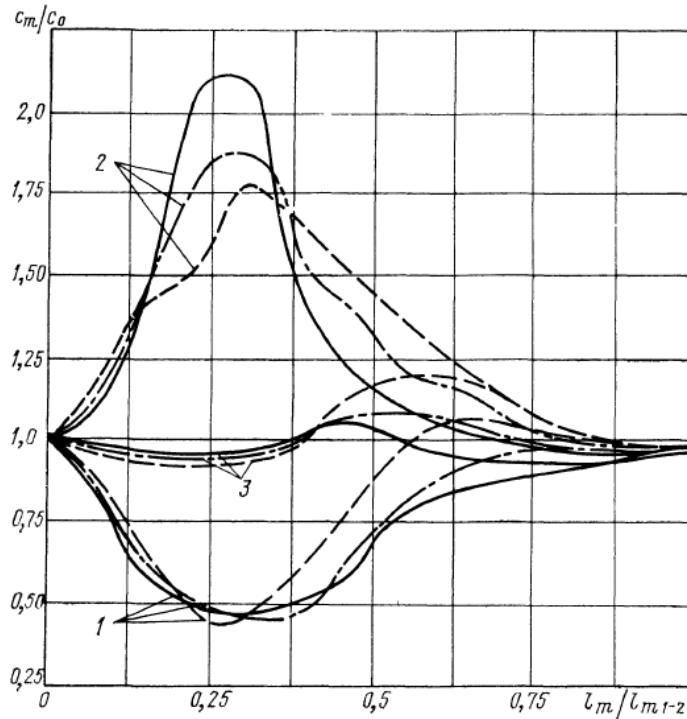


Рисунок 1.4 - Розподіл меридіональних швидкостей у робочому колесі відцентрового компресора з різною формою покривного диска: 1 - основний диск, 2 - покривний диск, 3 - середня поверхня

Спроба поставити аналітично форму поверхонь меридіонального контуру робочого колеса була зроблена в [3]. Авторами пропонується задавати гіперболічного форму твірних основного і покривного дисків в меридіональному перерізі (рис. 1.5). Вплив лопаток на потік враховувалося введенням в рівняння математичної моделі коефіцієнта загромадження і сил реакції лопаток на потік. Також ставилося закон зміни втрат по радіусу і ширині колеса. Форма покривного диска задавалася з умови забезпечення рівномірності потоку на виході.

Результати числового дослідження течії в програмному комплексі Fluent 6 показали, що забезпечити рівномірність швидкостей на виході з

колеса, не вдалося, однак вдалось уникнути відриву потоку у покривного диска.

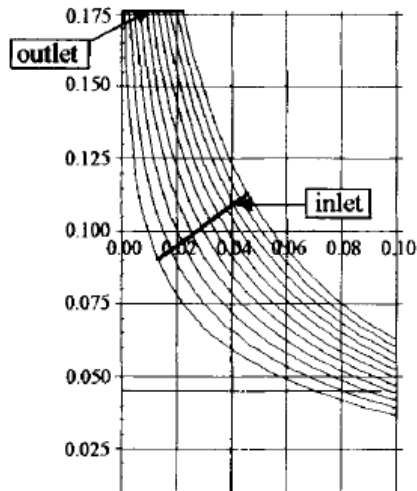


Рисунок 1.5 - Сімейство поверхонь течії, що покривають область робочого колеса, відповідно до методики [3]

Детально методика розрахунку течії газу в криволінійних осесиметричних нерухомих каналах турбомашин описана в [4]. При отриманні розрахункових залежностей приймалося, що течія стисливого газу нев'язка, усталена, без теплообміну з навколишнім середовищем. Наводиться також методика проектування осерадіальних каналів по заданим геометричним параметрам вхідного і вихідного перерізів каналу, а також його довжині (рис. 1.6). При цьому твірні втулкової і периферійної поверхонь представлені у вигляді кривих 2-го порядку, що дозволяє висловити аналітично співвідношення для побудови розрахункової сітки і розрахунку течії в каналі.

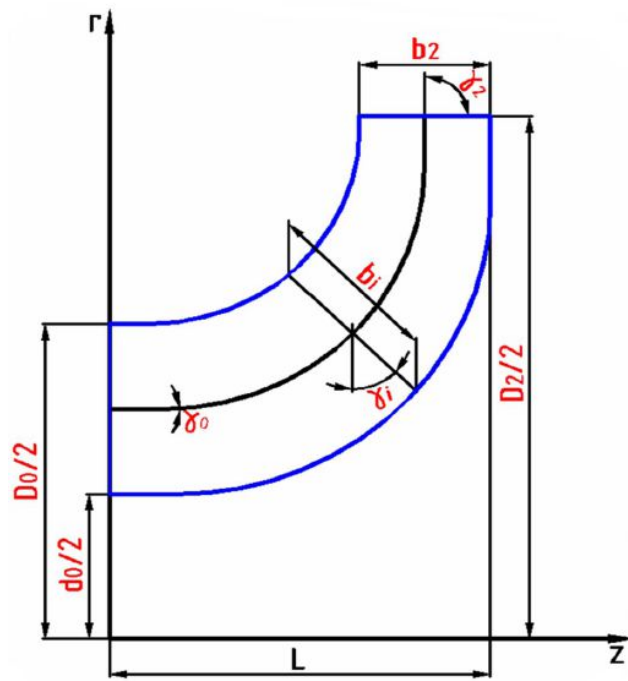


Рисунок 1.6 - Схема меридіонального контуру осерадіального каналу

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

2 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ОСЕРАДІАЛЬНИХ ОСЕСИМЕТРИЧНИХ КАНАЛІВ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ

2.1 Розрахунок течії в осерадіальному осесиметричному каналі

При отриманні залежностей, що дозволяють виконати розрахунок параметрів потоку газу в осерадіальному осесиметричному каналі, приймається що течія стисливого газу усталена, без теплообміну з навколишнім середовищем. Прийнята фізична модель, в якій газ в ядрі потоку вважається нев'язким, а в'язкість враховується при розрахунку примежового шару. Вибір такої схеми течії при використанні інтегральних залежностей для визначення параметрів газу в ядрі потоку та використанні при розрахунку течії в примежовому шарі однієї з напівемпіричних теорій дозволяє значно зменшити час, необхідний для виконання розрахунку [4,5]. Крім цього, при створенні методів розрахунку течії газу в окремих елементах проточної частини в кращій мірі можуть бути враховані особливості потоку в цих елементах, ніж в універсальних програмних комплексах.

У загальному випадку потік газу в криволінійних осесиметричних каналах може бути закрученим, тобто окружна проекція швидкості $c_u \neq 0$. У той же час практичне значення мають і методи розрахунку незакрученого потоку (вхідний пристрій і вихідне коліно зворотно-направляючого апарату відцентрового компресора).

Криволінійна система координат, зображена на рис. 2.1, складається з меридіональних проєкцій ліній течії S і ортогоналей до них n , c_m - меридіональна проєкція швидкості; R_m - радіус кривини лінії струму в меридіональній площині; $\frac{c_m^2}{R_m}$ - відцентрова сила, що діє на одиницю маси частки газу.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

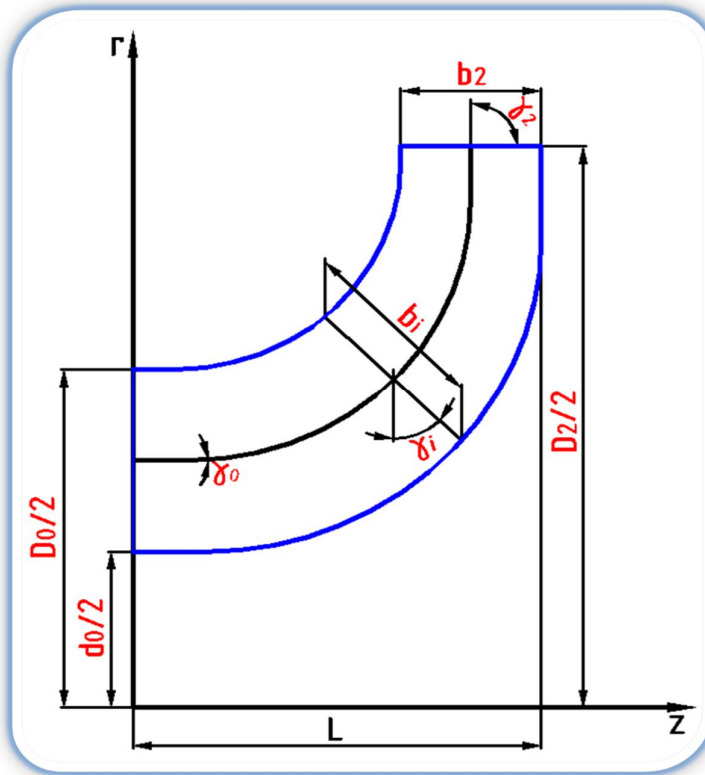


Рисунок 2.1 - Схема течії газу в осерядіальному каналі ($c_u = 0$)

Розглянемо диференціальні рівняння руху невязкого речовини:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + c_m \frac{\partial c_m}{\partial s} = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{c_m^2}{R_m} = 0. \quad (2.2)$$

З рівняння (2.1)

$$-\frac{\partial p}{\rho} = c_m \partial c_m. \quad (2.3)$$

Підставляючи рівняння (2.3) в (2.2) отримуємо

$$\frac{\partial c_m}{\partial n} - \frac{c_m}{R_m} = 0, \text{ или } \frac{\partial c_m}{c_m} - \frac{\partial n}{R_m} = 0. \quad (2.4)$$

Рівняння (2.4) не залежить від c_u і може бути отримано для випадку з закруткою потоку [4].

Після інтегрування рівняння (2.4) маємо

$$c_m = c_{m_0} \cdot e^{\int \frac{dn}{R_m}} = c_{m_0} \cdot e^A, \quad (2.5)$$

де c_{m_0} - швидкість на втулкової поверхні каналу.

Дана залежність дозволяє визначити значення швидкостей уздовж нормалі, якщо визначені значення інтеграла $A = \int \frac{dn}{R_m}$.

Для обчислення інтеграла $A = \int \frac{dn}{R_m}$ необхідно встановити залежність $R_m = f(n)$. Спростити завдання можна задавши лінійний закон зміни кривизни $k = \frac{1}{R}$ (Або радіусу кривини) ліній струму в меридіональній площині уздовж нормалі.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

При лінійному зміні кривини уздовж нормалі (рис. 2.2) кривина j - ой лінії течії визначається за формулою

$$k_j = k_{\text{вм}} + \frac{k_{\text{пер}} - k_{\text{вм}}}{b} \cdot n_j, \quad (2.6)$$

де $k_{\text{вм}}$ - кривина втулкової поверхні;

$k_{\text{пер}}$ - кривина периферійної поверхні;

b - відстань від втулки до периферії вздовж нормалі;

n_j - відстань по нормалі від поверхні втулки до точки, в якій розраховується швидкість c_{m_0} .

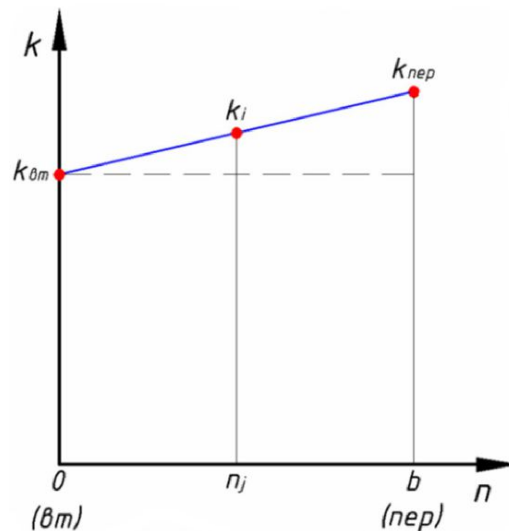


Рисунок 2.2 - Схема лінійного зміні кривини k вздовж нормалі

тоді інтеграл $A_j = \int_0^{n_j} \frac{dn}{R_m} = \int_0^{n_j} k_j \cdot dn$ визначається виразом

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		15

$$A_j = \int_0^{n_j} \left(k_{\text{вм}} + \frac{k_{\text{нпр}} - k_{\text{вм}}}{b} \cdot n_j \right) \cdot dn. \quad (2.7)$$

Після інтегрування отримаємо

$$A_j = \frac{n_j}{R_{\text{вм}}} + \frac{n_j^2}{2b} \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{нпр}}} - \frac{1}{R_{\text{вм}}} \right). \quad (2.8)$$

При лінійному зміні радіуса кривини уздовж нормалі (рис. 2.3) радіус кривини j - ой лінії струму визначається за формулою

$$R_j = R_{\text{вм}} - \frac{(R_{\text{вм}} - R_{\text{нпр}})}{b} \cdot n_j, \quad (2.9)$$

де $R_{\text{вм}}$ - радіус кривини втулкової поверхні;

$R_{\text{нпр}}$ - радіус кривини периферійної поверхні.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

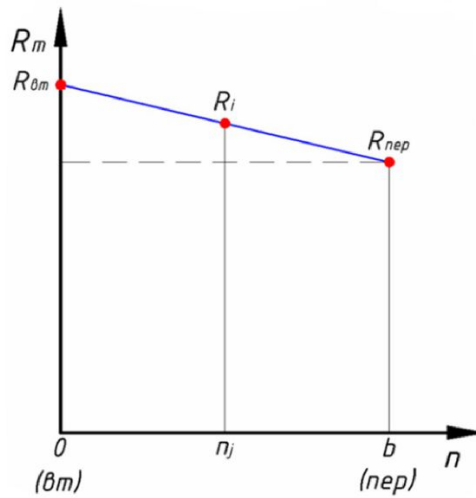


Рисунок 2.3 - Схема лінійного зміни радіуса кривини R_m вздовж нормалі

Для обчислення інтеграла $A = \int \frac{dn}{R_m}$ використовується підстановка

$$t = R_{0m} - \frac{(R_{0m} - R_{nep})}{b} \cdot n, \text{ тоді } dt = R_{0m} - \frac{(R_{0m} - R_{nep})}{b} \cdot dn \text{ і } dn = -\frac{b}{(R_{0m} - R_{nep})} \cdot dt.$$

$$A_j = \int_{0m}^j -\frac{b}{(R_{0m} - R_{nep})} \frac{dt}{t} = -\frac{b}{(R_{0m} - R_{nep})} \ln t \Big|_{0m}^j =$$

$$= -\frac{b}{(R_{0m} - R_{nep})} \cdot \ln \left[1 - \left(1 - \frac{R_{nep}}{R_{0m}} \right) \cdot \frac{n_j}{b} \right] \quad (2.10)$$

Слід зазначити, що використання формули (2.10) замість (2.8) приводить до незначного розбіжності значень швидкостей c_{m_j} , обчислених за формулою $c_{m_j} = c_{m_0} \cdot e^A$.

Потім на кожній ділянці ортогоналі визначається середня меридіональна швидкість

$$c_{mjcp} = \frac{c_{mj} + c_{m(j+1)}}{2}, \quad (2.11)$$

і розраховуються масові витрати через ділянки шириною Δn_j :

$$\Delta \bar{m}_j = \rho_j \cdot c_{mjcp} \cdot \pi \cdot D_{cpj} \cdot \Delta n_j, \quad (2.12)$$

де ρ_j - густина газу для j -го ділянки перетину;

D_{cpj} - середній діаметр j -го ділянки перетину;

$\Delta n_j = \frac{b_i}{N_2 - 1}$ - крок для кожної ортогоналі (N_2 - задається кількість ліній

струму).

Густина газу визначається з газодинамічною функцією $\varepsilon(\lambda_j) = \frac{\rho_j}{\rho_j^*}$:

$$\rho_j = \rho_j^* \cdot \varepsilon(\lambda_j) = \rho_j^* \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_j^2\right)^{\frac{1}{k-1}}, \quad (2.12)$$

де ρ_j^* - густина газу за повними параметрами;

$\lambda_j = \frac{c_{mj}}{a_{крj}}$ - наведена швидкість;

k - показник адіабати.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Тиск і температура адіабатически загальмованого потоку приймаються постійними по всьому каналу і рівними значенням цих параметрів на вході в канал ($p_j^* = p_0^*$, $T_j^* = T_0^*$). Відповідно з цим

$$\rho_j^* = \rho_0^* = \frac{p_0^*}{z \cdot R \cdot T_0^*}. \quad (2.13)$$

Тиск адіабатически загальмованого потоку на вході в канал

$$p_0^* = p_0 + \rho_0 \cdot \frac{c_{m0}^2}{2}. \quad (2.14)$$

Температура адіабатически загальмованого потоку на вході в канал

$$T_0^* = T_0 + \frac{c_{m0}^2}{2 \cdot c_p}. \quad (2.15)$$

Критична швидкість звуку потоку газу

$$a_{крj} = a_{кр} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k + 1} \cdot z \cdot R \cdot T_0^*}. \quad (2.16)$$

Розподіл тисків у каналі визначається з газодинамічної функції $\pi(\lambda_j)$:

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
						19
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$p_j = p_j^* \cdot \pi(\lambda_j) = p_0^* \cdot \pi(\lambda_j) = p_0^* \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_j^2\right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.17)$$

Для аналізу розподілу швидкостей в каналі також в кожному перетині визначається середневитратна швидкість

$$c_{cp} = \frac{\bar{m}_{зад}}{\pi \cdot b_i \cdot \rho_i \cdot (r_{emi} + r_{неpi})}. \quad (2.18)$$

Довжина кожної ортогоналі визначається за формулою

$$b_i = \sqrt{(r_{неpi} - r_{emi})^2 + (z_{неpi} - z_{emi})^2}. \quad (2.19)$$

Значення $c_{m_{0i}}$ для i -ої ортогоналі визначається методом послідовних наближень з умови $\bar{m}_{зад} = \sum_{j=1}^{N_2} \Delta m_j$ для кожного перетину. Розрахунок ведеться поки не виконується умова

$$\varepsilon = \left| \frac{\bar{m}_{зад} - \bar{m}_p}{\bar{m}_{зад}} \right| \leq 0,001, \quad (2.20)$$

$$\text{де } \bar{m}_p = \sum_{j=1}^{N_2} \Delta m_j.$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Масова витрата $\bar{m}_{зад}$ визначається по заданих параметрах потоку на вході в канал:

$$\bar{m}_{зад} = \rho_0 \cdot c_{m0} \cdot \pi \cdot D_0 \cdot b_0, \quad (2.21)$$

де $\rho_0 = \frac{p_0}{R \cdot T_0}$ - густина потоку газу на вході в канал. Розподіл швидкості на вході в канал вважається рівномірним.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

2.2 Методика проектування меридіонального контуру осерадіального каналу

Проектування меридіонального контуру каналу (рис. 2.4) включає в себе кілька етапів:

- побудова середньої лінії каналу;
- визначення координат серединної ортогоналі каналу;
- побудова втулкової і периферійної поверхонь каналу;
- побудова ортогонален до середньої лінії.

Початкові дані:

D_0 - діаметр каналу на вході;

b_0 - ширина каналу на вході;

D_2 - периферійний діаметр каналу на виході;

d_2 - втулковий діаметр каналу на виході;

γ_{0cp} - кут між дотичною до середньої лінії і віссю z на вході в канал;

γ_{2cp} - кут між дотичною до середньої лінії і віссю z на виході з каналу;

γ_{0em} - кут між дотичною до твірної втулкової поверхні і віссю z на вході в канал;

γ_{2em} - кут між дотичною до твірної втулкової поверхні і віссю z на виході з каналу;

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

$\gamma_{0пер}$ - кут між дотичною до твірної периферійної поверхні і віссю z на вході в канал;

$\gamma_{2пер}$ - кут між дотичною до твірної периферійної поверхні і віссю z на виході з каналу;

f_2 - коефіцієнт площі каналу.

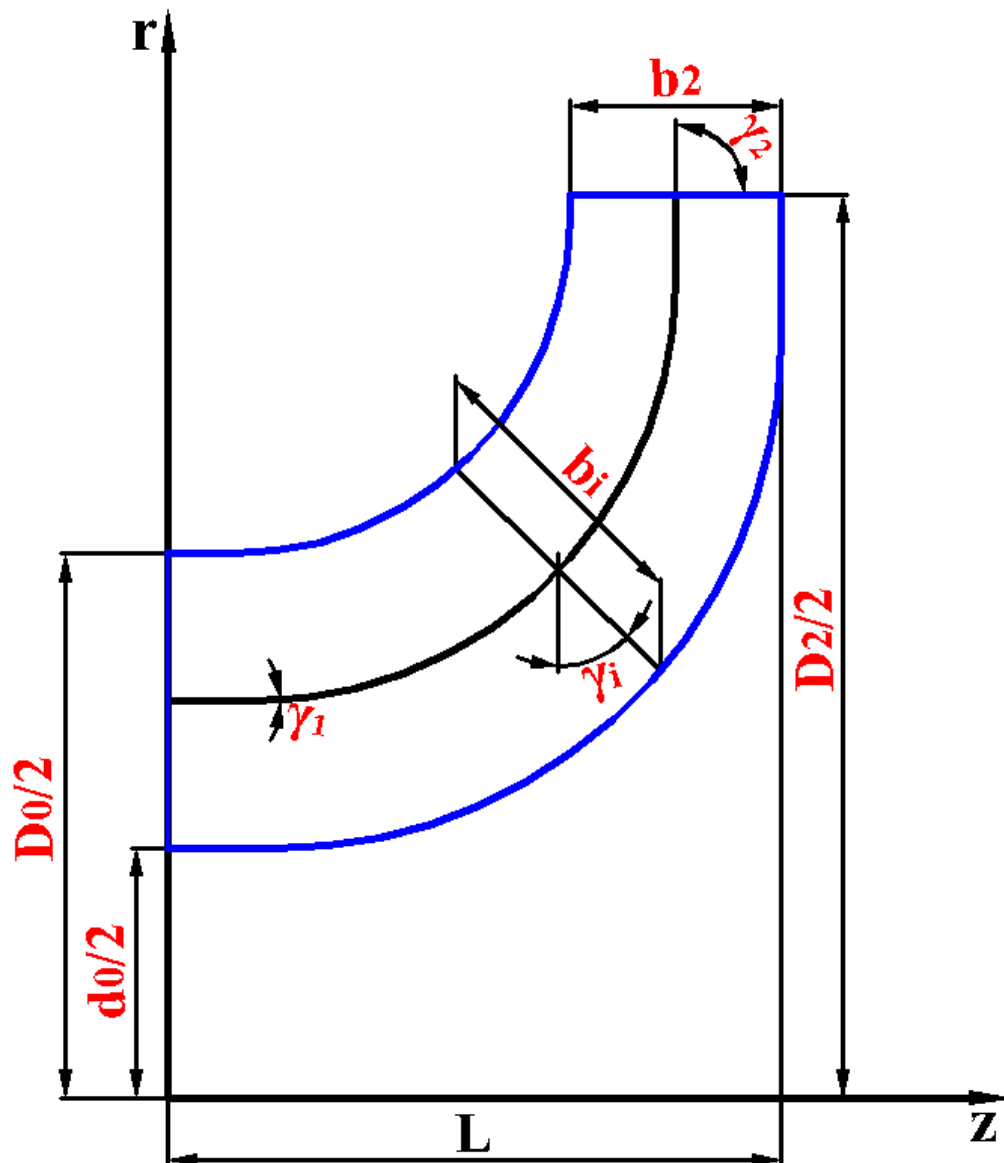


Рисунок 2.4 - Схема осерадіального каналу

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

2.2.1 Визначення осьової довжини каналу

Осьова довжина каналу визначається за формулою

$$L = k_1 \left(b_0 + \frac{D_0 - D_2}{2} \right), \quad (2.22)$$

де $k_1 = 0,7 \div 1,2$ - коефіцієнт для визначення довжини каналу.

Довжина каналу може здаватися в діапазоні $0,15 \leq \frac{L}{D_0} \leq 0,35$.

2.2.2 Визначення параметрів середньої лінії меридіонального контуру

Поворот потоку в меридіональній площині рекомендується проводити з максимально можливим радіусом кривини. Цій умові відповідає дуга кола [6]. Середня лінія будується в вигляді дуги кола 04 і прямолінійного відрізка 42 (рис. 2.5).

Координати точки 0: $z_0 = \frac{1}{2}b_0$, $r_0 = \frac{D_0}{2}$. Координати точки 2: $z_2 = L$,

$$r_2 = \frac{D_2 + d_2}{4}.$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24

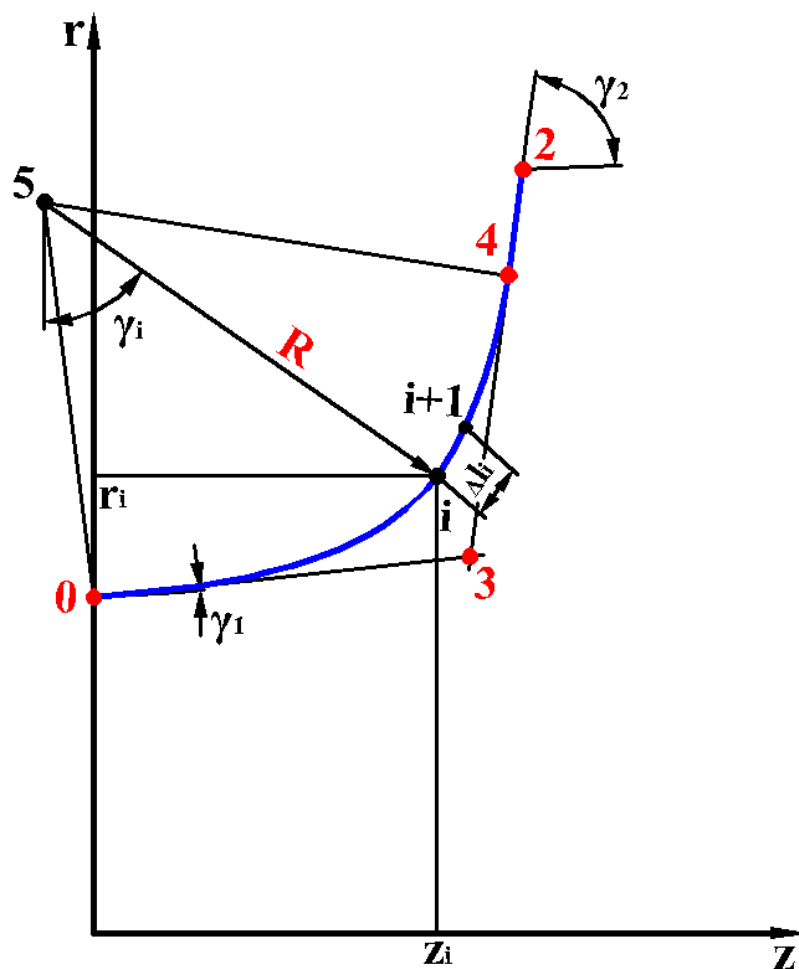


Рисунок 2.5 - Побудова середньої лінії меридіонального контуру каналу

Рівняння прямої, що проходить через точку 0 під кутом γ_{0cp} до осі z

$$r - r_0 = (z - z_0)tg\gamma_{0cp} \cdot \quad (2.23)$$

Аналогічно для прямої, що проходить через точку 2 під кутом γ_{2cp} до осі z:

$$r - r_2 = (z - z_2)tg\gamma_{2cp} \cdot \quad (2.24)$$

Вирішуючи систему з рівнянь (2.23) і (2.24), визначаються координати точки 3 перетину цих прямих

$$z_3 = \frac{r_2 - r_0 + z_0 \operatorname{tg} \gamma_{0cp} - z_2 \operatorname{tg} \gamma_{2cp}}{\operatorname{tg} \gamma_{0cp} - \operatorname{tg} \gamma_{2cp}}, \quad (2.25)$$

$$r_3 = \frac{(z_2 - z_0) \operatorname{tg} \gamma_{0cp} \operatorname{tg} \gamma_{2cp} + r_0 \operatorname{tg} \gamma_{2cp} - r_2 \operatorname{tg} \gamma_{0cp}}{\operatorname{tg} \gamma_{2cp} - \operatorname{tg} \gamma_{0cp}}. \quad (2.26)$$

Координати точки 4 визначаються з умови рівності відрізків 03 і 34

$$l_{03} = l_{34} = \sqrt{(z_3 - z_0)^2 + (r_0 - r_3)^2}, \quad (2.27)$$

тоді

$$z_4 = l_{03} \cos(180 - \gamma_{2cp}) + z_3, \quad (2.28)$$

$$r_4 = r_3 - l_{03} \sin(180 - \gamma_{2cp}). \quad (2.29)$$

Координати центру кола (точка 5) визначаються точкою перетину двох прямих, перпендикулярних прямих 03 і 34. Рівняння прямої 05

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		26

$$r - r_0 = (z - z_0) \cdot \operatorname{tg}(\gamma_{0cp} - 90^\circ). \quad (2.30)$$

Рівняння прямої 45

$$r - r_4 = (z - z_4) \cdot \operatorname{tg}(\gamma_{2cp} - 90^\circ). \quad (2.31)$$

Тоді координати точки 5

$$z_5 = \frac{r_4 - r_0 + z_0 \operatorname{tg}(\gamma_{0cp} - 90^\circ) - z_4 \operatorname{tg}(\gamma_{2cp} - 90^\circ)}{\operatorname{tg}(\gamma_{0cp} - 90^\circ) - \operatorname{tg}(\gamma_{2cp} - 90^\circ)}, \quad (2.32)$$

$$r_5 = (z_5 - z_0) \cdot \operatorname{tg}(\gamma_{0cp} - 90^\circ) + r_0. \quad (2.33)$$

радіус кривини

$$R = \sqrt{(z_5 - z_4)^2 + (r_5 - r_4)^2}. \quad (2.34)$$

Довжина середньої лінії визначається як сума довжин дуги кола 04 і відрізка 42.

$$l_{04} = (\gamma_{2cp} - \gamma_{0cp}) R \frac{\pi}{180^\circ}, \quad (2.35)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

$$l_{42} = \sqrt{(z_2 - z_4)^2 + (r_4 - r_2)^2}, \quad (2.36)$$

$$l_{02} = l_{04} + l_{42}. \quad (2.37)$$

2.2.3 Визначення координат серединної ортогоналі

Координати серединної ортогоналі (рис. 2.6) визначаються відповідно до заданого законом зміни площі. Надалі координати перетину серединної ортогоналі з твірними втулкової і периферійної поверхней використовуються для знаходження коефіцієнтів в рівняннях цих твірних.

Половина довжини середньої лінії

$$l_{cp} = \frac{l_{02}}{2}. \quad (2.38)$$

Центральний кут для дуги довжиною l_{cp}

$$\Delta\gamma_{cp} = \frac{l_{cp}}{R}. \quad (2.39)$$

Координати точки, розташованої на середині середньої лінії

$$z_{cp} = z_5 - R \cdot \sin(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}), \quad (2.40)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		28

$$r_{cp} = r_5 - R \cdot \cos(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}). \quad (2.41)$$

серединний кут

$$\gamma_{cp} = \Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}. \quad (2.42)$$

Закон зміни площі осесиметричного осерадіального каналу задається у вигляді квадратичної залежності

$$F_i = f_0 + f_1 l_i + f_2 l_i^2, \quad (2.43)$$

де $l_i = \sum_{i=1}^N \Delta l_i = 0 \dots l_{02}$ - поточне значення уздовж довжини середньої лінії

каналу;

f_0, f_1, f_2 - коефіцієнти площі каналу.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
						29
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

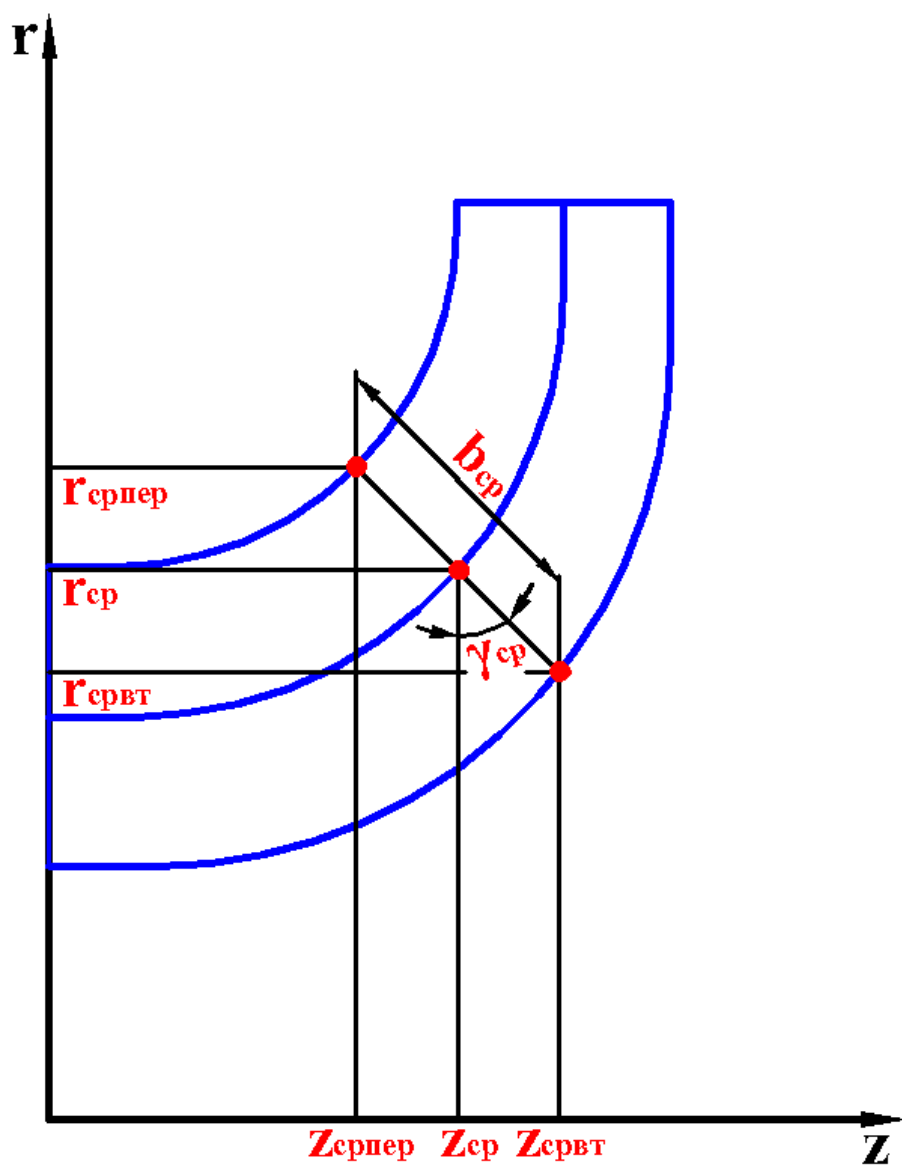


Рисунок 2.6 - Визначення координат серединної ортогоналі

коefficientи f_0 і f_1 визначаються з граничних умов.

при $l_i = 0$

$$F_i = F_0 = \pi b_0 D_0, \quad (2.44)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

при $l_i = l_{02}$

$$F_i = F = \pi \left(\frac{D_2^2 - d_2^2}{4} \right). \quad (2.45)$$

Тоді закон зміни площі набуде вигляду

$$F_i = F_0 + \frac{F_2 - F_0}{l_{02}} l_i + f_2 l_i (l_{02} - l_i). \quad (2.46)$$

значення коефіцієнта f_2 задається у вихідних даних. При лінійному законі зміни площі $f_2 = 0$. При підвищеній дифузорового каналу на вході $f_2 > 0$, При підвищеній дифузорового каналу на виході $f_2 < 0$.

Серединна площа каналу

$$F_{cp} = \frac{F_0 + F_2}{2} + f_2 \frac{l_{02}^2}{4}. \quad (2.47)$$

Ширина серединного перетину каналу

$$b_{cp} = \frac{F_{cp}}{2\pi r_{cp}}, \quad (2.48)$$

де r_{cp} - координата розрахункової точки на середині середньої лінії каналу.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Координати точки перетину серединної ортогоналі і утворює втулкової поверхні

$$z_{cp\dot{\alpha}\dot{\delta}} = z_{cp} - \frac{b_{cp}}{2} \cdot \sin(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}), \quad (2.49)$$

$$r_{cp\dot{\alpha}\dot{\delta}} = r_{cp} - \frac{b_{cp}}{2} \cdot \cos(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}). \quad (2.50)$$

Координати точки перетину серединної ортогоналі і твірної периферійної поверхні

$$z_{cpnep} = z_{cp} + \frac{b_{cp}}{2} \cdot \sin(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}), \quad (2.51)$$

$$r_{cpnep} = r_{cp} + \frac{b_{cp}}{2} \cdot \cos(\Delta\gamma_{cp} + 180^\circ - \gamma_{2cp}). \quad (2.52)$$

2.2.4 Визначення параметрів втулкової і периферійної поверхонь каналу

Рівняння твірних втулкової і периферійної поверхонь визначаються у вигляді кривих другого порядку. Для системи координат r, z дані рівняння матимуть вигляд

$$r^2 + A \cdot z^2 + 2 \cdot B \cdot z \cdot r + 2 \cdot C \cdot r + 2 \cdot D \cdot z + E = 0, \text{ или} \quad (2.53)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$A \cdot z^2 + 2 \cdot B \cdot z \cdot r + 2 \cdot C \cdot r + 2 \cdot D \cdot z + E = -r^2. \quad (2.54)$$

Після диференціювання по z отримаємо

$$2 \cdot A \cdot z + B \cdot (2 \cdot r + 2 \cdot z \cdot r') + 2 \cdot C \cdot r' + 2 \cdot D = -2 \cdot r \cdot r', \quad (2.55)$$

де $r' = \operatorname{tg} \gamma$.

Після поділу на 2 отримаємо

$$A \cdot z + B \cdot (r + z \cdot r') + C \cdot r' + D = -r \cdot r'. \quad (2.56)$$

Для визначення коефіцієнтів A, B, C, D, E рівняння необхідно скласти систему з 5 рівнянь.

Здається 5 наступних граничних умов:

1) при $r_0 = \frac{D_0}{2}, z = a \begin{cases} \text{для втулки } a = 0 \\ \text{для периферії } a = b_0 \end{cases}$, Тоді рівняння кривої набуде

вигляду

$$A \cdot a^2 + B \cdot D_0 \cdot a + C \cdot D_0 + 2 \cdot D \cdot a + E = -\frac{D_0^2}{4} - 1\text{-е рівняння системи;}$$

2) при $r_0 = \frac{D_0}{2}, z = a, r' = \operatorname{tg} \gamma_0 \begin{cases} \text{для втулки } \gamma_0 = \gamma_{0\text{вн}} \\ \text{для периферії } \gamma_0 = \gamma_{0\text{пер}} \end{cases}$, тоді

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$A \cdot a + B \cdot \left(\frac{D_0}{2} + 2 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \gamma_0\right) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_0 + D = -\frac{D_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_0 - 2\text{-е рiвняння системи};$$

$$3) \text{ при } z = L, r = b \left\{ \begin{array}{l} \text{для втулки } b = \frac{d_2}{2} \\ \text{для периферии } b = \frac{D_2}{2} \end{array} \right\}, \text{ тоді}$$

$$A \cdot L^2 + 2 \cdot B \cdot L \cdot b + 2 \cdot C \cdot b + 2 \cdot D \cdot L + E = -b^2 - 3\text{-е рiвняння системи};$$

$$4) \text{ при } z = L, r = b, r' = \operatorname{tg} \gamma_2 \left\{ \begin{array}{l} \text{для втулки } \gamma_2 = \gamma_{2\text{вт}} \\ \text{для периферии } \gamma_2 = \gamma_{2\text{пер}} \end{array} \right\}, \text{ тоді}$$

$$A \cdot L + B \cdot (b + L \cdot \operatorname{tg} \gamma_2) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_2 + D = -b \cdot \operatorname{tg} \gamma_2 - 4\text{-е рiвняння системи};$$

$$5) \text{ при } z = z_{cp} \left\{ \begin{array}{l} \text{для втулки } z_{cp} = z_{cp\text{вт}} \\ \text{для периферии } z_{cp} = z_{cp\text{пер}} \end{array} \right\}, r = r_{cp} \left\{ \begin{array}{l} \text{для втулки } r_{cp} = r_{cp\text{вт}} \\ \text{для периферии } r_{cp} = r_{cp\text{пер}} \end{array} \right\}, \text{ тоді}$$

$$A \cdot z_{cp}^2 + 2 \cdot B \cdot z_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot C \cdot r_{cp} + 2 \cdot D \cdot z_{cp} + E = -r_{cp}^2 - 5\text{-е рiвняння системи}.$$

Для заданих граничних умов отримано систему з 5 рiвнянь:

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\left\{ \begin{array}{l} A \cdot a^2 + B \cdot D_0 \cdot a + C \cdot D_0 + 2 \cdot D \cdot a + E = -\frac{D_0^2}{4}, \\ A \cdot a + B \cdot \left(\frac{D_0}{2} + 2 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \gamma_0\right) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_0 + D = -\frac{D_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_0, \\ A \cdot L^2 + 2 \cdot B \cdot L \cdot b + 2 \cdot C \cdot b + 2 \cdot D \cdot L + E = -b^2, \\ A \cdot L + B \cdot (b + L \cdot \operatorname{tg} \gamma_2) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_2 + D = -b \cdot \operatorname{tg} \gamma_2, \\ A \cdot z_{cp}^2 + 2 \cdot B \cdot z_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot C \cdot r_{cp} + 2 \cdot D \cdot z_{cp} + E = -r_{cp}^2. \end{array} \right.$$

Потім системи рівнянь для втулкової і периферійної поверхонь окремо вирішуються методом Крамера [7].

Рівняння кривої в явному вигляді

$$r = G \cdot z + H \pm \sqrt{J \cdot z^2 + K \cdot z + M}, \quad (2.57)$$

де $G = -B$, $H = -C$, $J = B^2 - A$, $K = 2 \cdot (B \cdot C - D)$, $M = C^2 - E$.

Знак перед коренем береться протилежним знаку перед H .

Рівняння середньої лінії також записується у вигляді кривої другого порядку. Для визначення коефіцієнтів в рівнянні середньої лінії задаються наступні граничні умови:

1) при $r_0 = \frac{D_0}{2}$, $z = \frac{b_0}{2}$, Тоді рівняння кривої набуде вигляду

$$A \cdot \frac{b_0^2}{4} + B \cdot D_0 \cdot \frac{b_0}{2} + C \cdot D_0 + D \cdot b_0 + E = -\frac{D_0^2}{4} - 1\text{-е рівняння системи;}$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2) при $r_0 = \frac{D_0}{2}, z = \frac{b_0}{2}, r' = \text{tg}\gamma_{0cp}$, тоді

$$A \cdot \frac{b_0}{2} + B \cdot \left(\frac{D_0}{2} + b_0 \cdot \text{tg}\gamma_{0cp} \right) + C \cdot \text{tg}\gamma_{0cp} + D = -\frac{D_0}{2} \cdot \text{tg}\gamma_{0cp} - 2\text{-е рівняння системи};$$

3) при $z = L, r = \frac{d_2 + D_2}{4}$, тоді

$$A \cdot L^2 + B \cdot L \cdot \frac{d_2 + D_2}{2} + C \cdot \frac{d_2 + D_2}{2} + 2 \cdot D \cdot L + E = -\frac{(d_2 + D_2)^2}{16} - 3\text{-е рівняння системи};$$

4) при $z = L, r = \frac{d_2 + D_2}{4}, r' = \text{tg}\gamma_{2cp}$, тоді

$$A \cdot L + B \cdot \left(\frac{d_2 + D_2}{4} + L \cdot \text{tg}\gamma_{2cp} \right) + C \cdot \text{tg}\gamma_{2cp} + D = -\frac{d_2 + D_2}{4} \cdot \text{tg}\gamma_{2cp} - 4\text{-е рівняння системи};$$

5) при $z = z_{cp}, r = r_{cp}$, тоді

$$A \cdot z_{cp}^2 + 2 \cdot B \cdot z_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot C \cdot r_{cp} + 2 \cdot D \cdot z_{cp} + E = -r_{cp}^2 - 5\text{-е рівняння системи}.$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Отримано система рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} A \cdot \frac{b_0^2}{4} + B \cdot D_0 \cdot \frac{b_0}{2} + C \cdot D_0 + D \cdot b_0 + E = -\frac{D_0^2}{4}, \\ A \cdot \frac{b_0}{2} + B \cdot \left(\frac{D_0}{2} + b_0 \cdot \operatorname{tg} \gamma_{0cp} \right) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_{0cp} + D = -\frac{D_0}{2} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{0cp}, \\ A \cdot L^2 + B \cdot L \cdot \frac{d_2 + D_2}{2} + C \cdot \frac{d_2 + D_2}{2} + 2 \cdot D \cdot L + E = -\frac{(d_2 + D_2)^2}{16}, \\ A \cdot L + B \cdot \left(\frac{d_2 + D_2}{4} + L \cdot \operatorname{tg} \gamma_{2cp} \right) + C \cdot \operatorname{tg} \gamma_{2cp} + D = -\frac{d_2 + D_2}{4} \cdot \operatorname{tg} \gamma_{2cp}, \\ A \cdot z_{cp}^2 + 2 \cdot B \cdot z_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot C \cdot r_{cp} + 2 \cdot D \cdot z_{cp} + E = -r_{cp}^2. \end{array} \right.$$

Аналогічно, як для втулкової і периферійної поверхонь, дана система вирішується методом Крамера.

2.2.5 Побудова ортогоналей до середньої лінії

Рівняння ортогоналі до середньої лінії в неявному вигляді

$$\left(\frac{\partial f_{cp}}{\partial r_{cp}} \right)_i \cdot (z - z_{cpi}) - \left(\frac{\partial f_{cp}}{\partial z_{cp}} \right)_i \cdot (r - r_{cpi}) = 0, \quad (2.58)$$

де f_{cp} - рівняння середньої лінії.

після перетворення

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$z - z_{cpi} = (r - r_{cpi}) \cdot \frac{\left(\frac{\partial f_{cp}}{\partial z_{cp}}\right)_i}{\left(\frac{\partial f_{cp}}{\partial r_{cp}}\right)_i}. \quad (2.59)$$

Координати точок перетину ортогонален з середньою лінією

$$z_{cpi} = z_0 + \Delta z \cdot (i - 1), \quad (2.60)$$

де Δz - приріст довжини по осі z (Задається);

$i = 1 \dots N_1$ - номер поточної ортогоналі;

N_1 - кількість ортогонален;

$$r_{cpi} = G_{cp} \cdot z_{cpi} + H_{cp} \pm \sqrt{J_{cp} \cdot z_{cpi}^2 + K_{cp} \cdot z_{cpi} + M_{cp}}, \quad (2.61)$$

де $G_{cp} = -B_{cp}$, $H_{cp} = -C_{cp}$, $J_{cp} = B_{cp}^2 - A_{cp}$, $K_{cp} = 2 \cdot (B_{cp} \cdot C_{cp} - D_{cp})$, $M_{cp} = C_{cp}^2 - E_{cp}$.

Знак перед коренем береться протилежним знаку перед H_{cp} .

Рівняння середньої лінії

$$f_{cp} = r_{cp}^2 + A_{cp} \cdot z_{cp}^2 + 2 \cdot B_{cp} \cdot z_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot C_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot D_{cp} \cdot z_{cp} + E_{cp} = 0. \quad (2.62)$$

Приватні похідні від функції f_{cp} по z_{cp} і r_{cp}

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\frac{\partial f_{cp}}{\partial z_{cp}} = 2 \cdot A_{cp} \cdot z_{cp} + 2 \cdot B_{cp} \cdot r_{cp} + 2 \cdot D_{cp} = 2 \cdot (A_{cp} \cdot z_{cp} + B_{cp} \cdot r_{cp} + D_{cp}), \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial f_{cp}}{\partial r_{cp}} = 2 \cdot r_{cp} + 2 \cdot B_{cp} \cdot z_{cp} + 2 \cdot C_{cp} = 2 \cdot (r_{cp} + B_{cp} \cdot z_{cp} + C_{cp}). \quad (2.64)$$

Згідно з останніми виразами визначаються похідні для i -ої ортогоналі при z_{cpi} і r_{cpi} .

позначимо

$$a_{cpi} = A_{cp} \cdot z_{cpi} + B_{cp} \cdot r_{cpi} + D_{cp}, \quad (2.65)$$

$$b_{cpi} = r_{cpi} + B_{cp} \cdot z_{cpi} + C_{cp}. \quad (2.66)$$

Тоді рівняння ортогоналі набуде вигляду

$$z = z_{cpi} - r_{cpi} \cdot \frac{a_{cpi}}{b_{cpi}} + r \cdot \frac{a_{cpi}}{b_{cpi}}. \quad (2.67)$$

Для компактності запису рівнянь позначаємо

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата		

$$k_{cpi} = \frac{a_{cpi}}{b_{cpi}}, \quad (2.68)$$

$$m_{cpi} = z_{cpi} - r_{cpi} \cdot k_{cpi}. \quad (2.69)$$

тоді

$$z = k_{cpi} \cdot r + m_{cpi}, \quad (2.70)$$

$$z^2 = k_{cpi}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot k_{cpi} \cdot r \cdot m_{cpi} + m_{cpi}^2. \quad (2.71)$$

Для визначення координат точок перетину ортогонален утворюють втулкової і периферійної поверхонь складається система рівнянь

$$\begin{cases} r^2 + A \cdot z^2 + 2 \cdot B \cdot z \cdot r + 2 \cdot C \cdot r + 2 \cdot D \cdot z + E = 0, \\ z = k_{cpi} \cdot r + m_{cpi}. \end{cases} \quad (2.72)$$

Система вирішується методом підстановки:

$$r^2 + A \cdot (k_{cpi}^2 \cdot r^2 + 2 \cdot k_{cpi} \cdot r \cdot m_{cpi} + m_{cpi}^2) + 2 \cdot B \cdot (k_{cpi} \cdot r + m_{cpi}) \cdot r + 2 \cdot C \cdot r + 2 \cdot D \cdot (k_{cpi} \cdot r + m_{cpi}) + E = 0, \quad (2.73)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
						40
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$r^2 \cdot (1 + A \cdot k_{cpi}^2 + 2 \cdot B \cdot k_{cpi}) + 2 \cdot r \cdot (A \cdot k_{cpi} \cdot m_{cpi} + B \cdot m_{cpi} + C + D \cdot k_{cpi}) + (A \cdot m_{cpi}^2 + 2 \cdot D \cdot m_{cpi} + E) = 0. \quad (2.74)$$

ПОЗНАЧАЄМО

$$p_i = 1 + A \cdot k_{cpi}^2 + 2 \cdot B \cdot k_{cpi}, \quad (2.75)$$

$$q_i = A \cdot k_{cpi} \cdot m_{cpi} + B \cdot m_{cpi} + C + D \cdot k_{cpi}, \quad (2.76)$$

$$s_i = A \cdot m_{cpi}^2 + 2 \cdot D \cdot m_{cpi} + E. \quad (2.77)$$

Отримано квадратичне рівняння щодо r :

$$r^2 \cdot p_i + 2 \cdot q_i \cdot r + s_i = 0. \quad (2.78)$$

Корінь рівняння визначається за формулою

$$r = \frac{-q_i - \sqrt{q_i^2 - p_i \cdot s_i}}{p_i}. \quad (2.79)$$

В результаті координати точок перетину ортогоналей з твірної втулкової поверхні матимуть вигляд:

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
						41
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

$$r_{\text{emi}} = \frac{-q_{\text{emi}} - \sqrt{q_{\text{emi}}^2 - p_{\text{emi}} \cdot s_{\text{emi}}}}{p_{\text{emi}}}, \quad (2.80)$$

де $p_{\text{emi}} = 1 + A_{\text{em}} \cdot k_{\text{cpi}}^2 + 2 \cdot B_{\text{em}} \cdot k_{\text{cpi}}$,

$$q_{\text{emi}} = A_{\text{em}} \cdot k_{\text{cpi}} \cdot m_{\text{cpi}} + B_{\text{em}} \cdot m_{\text{cpi}} + C_{\text{em}} + D_{\text{em}} \cdot k_{\text{cpi}},$$

$$s_{\text{emi}} = A_{\text{em}} \cdot m_{\text{cpi}}^2 + 2 \cdot D_{\text{em}} \cdot m_{\text{cpi}} + E_{\text{em}};$$

$$z_{\text{emi}} = k_{\text{cpi}} \cdot r_{\text{emi}} + m_{\text{cpi}}. \quad (2.81)$$

Координати точок перетину ортогоналей з твірної периферійної поверхні:

$$r_{\text{неpi}} = \frac{-q_{\text{неpi}} - \sqrt{q_{\text{неpi}}^2 - p_{\text{неpi}} \cdot s_{\text{неpi}}}}{p_{\text{неpi}}}, \quad (2.82)$$

де $p_{\text{неpi}} = 1 + A_{\text{неп}} \cdot k_{\text{cpi}}^2 + 2 \cdot B_{\text{неп}} \cdot k_{\text{cpi}}$,

$$q_{\text{неpi}} = A_{\text{неп}} \cdot k_{\text{cpi}} \cdot m_{\text{cpi}} + B_{\text{неп}} \cdot m_{\text{cpi}} + C_{\text{неп}} + D_{\text{неп}} \cdot k_{\text{cpi}},$$

$$s_{\text{неpi}} = A_{\text{неп}} \cdot m_{\text{cpi}}^2 + 2 \cdot D_{\text{неп}} \cdot m_{\text{cpi}} + E_{\text{неп}};$$

$$z_{\text{неpi}} = k_{\text{cpi}} \cdot r_{\text{неpi}} + m_{\text{cpi}}. \quad (2.83)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		42

2.2.6 Визначення радіусів кривини для втулкової і периферійної поверхонь

Значення радіуса кривини в довільній точці (рис.2.7), що знаходиться на твірної втулкової або периферійної поверхні, якщо $f(z,r) = 0$, Визначається за формулою

$$R_s = \frac{\left[\left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)^2 \right]^{3/2}}{\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)^2 - 2 \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial z \cdot \partial r} \cdot \frac{\partial f}{\partial z} \cdot \frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} \cdot \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2}, \quad (2.84)$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

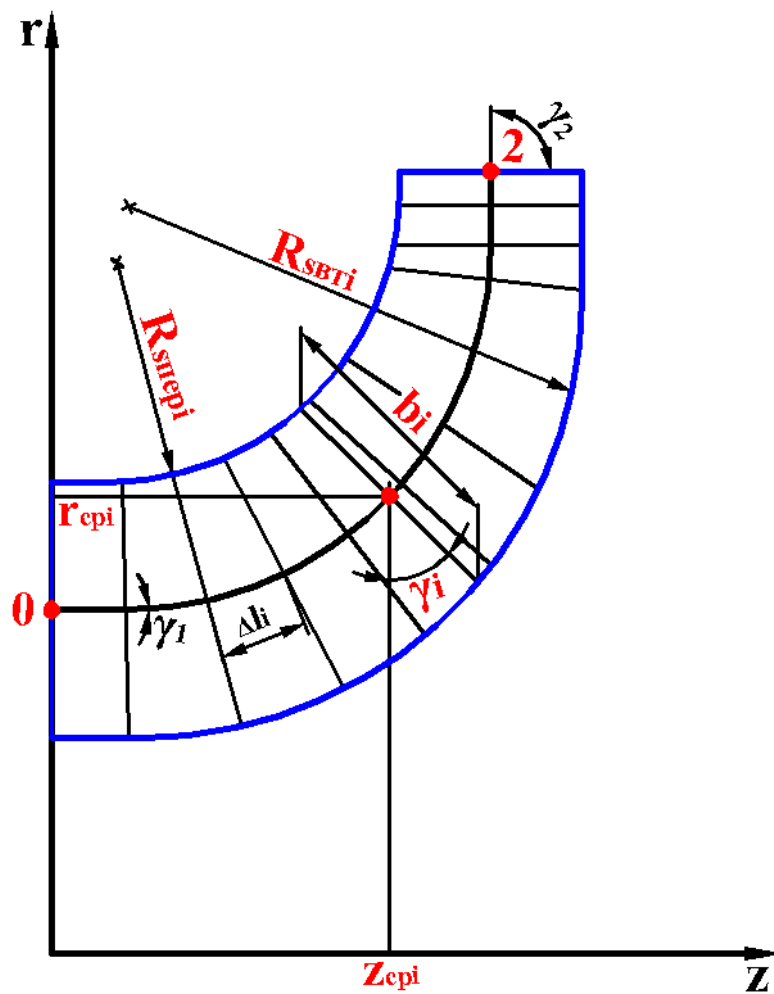


рисунок 2.7 - Визначення радіусів кривини втулкової і периферійної поверхонь

$$\text{де } f = r^2 + A \cdot z^2 + 2 \cdot B \cdot z \cdot r + 2 \cdot C \cdot r + 2 \cdot D \cdot z + E = 0,$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 2 \cdot A \cdot z + 2 \cdot B \cdot r + 2 \cdot D = 2 \cdot (A \cdot z + B \cdot r + D),$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} = 2 \cdot r + 2 \cdot B \cdot z + 2 \cdot C = 2 \cdot (r + B \cdot z + C),$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = 2 \cdot A, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} = 2, \quad \frac{\partial^2 f}{\partial z \cdot \partial r} = 2 \cdot B.$$

Позначаємо

$$A \cdot z + B \cdot r + D = dfz,$$

$$r + B \cdot z + C = dfr.$$

тоді

$$\frac{\partial f}{\partial z} = 2 \cdot dfz,$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} = 2 \cdot dfr.$$

З урахуванням прийнятих позначень вираз для радіуса кривини матиме вигляд

$$R_s = \frac{8 \cdot [(dfz)^2 + (dfr)^2]^{\frac{3}{2}}}{2 \cdot A \cdot 4 \cdot (dfr)^2 - 2 \cdot 2 \cdot B \cdot 2 \cdot (dfz) \cdot 2 \cdot (dfr) + 2 \cdot 4 \cdot (dfz)^2},$$

$$R_s = \frac{[(dfz)^2 + (dfr)^2]^{\frac{3}{2}}}{A \cdot (dfr)^2 - 2 \cdot B \cdot (dfz) \cdot (dfr) + (dfz)^2}. \quad (2.85)$$

Значення радіуса кривизни для і-ої точки твірної втулкової поверхні

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		45

$$R_{semi} = \frac{\left[(dfz_{emi})^2 + (dfr_{emi})^2 \right]^{3/2}}{A_{em} \cdot (dfr_{emi})^2 - 2 \cdot B_{em} \cdot (dfz_{emi}) \cdot (dfr_{emi}) + (dfz_{emi})^2}, \quad (2.86)$$

де $dfz_{emi} = A_{em} \cdot z_{emi} + B_{em} \cdot r_{emi} + D_{em}$, $dfr_{emi} = r_{emi} + B_{em} \cdot z_{emi} + C_{em}$.

Значення радіуса кривизни для і-ої точки твірної периферійної поверхні

$$R_{nepi} = \frac{\left[(dfz_{nepi})^2 + (dfr_{nepi})^2 \right]^{3/2}}{A_{nep} \cdot (dfr_{nepi})^2 - 2 \cdot B_{nep} \cdot (dfz_{nepi}) \cdot (dfr_{nepi}) + (dfz_{nepi})^2}, \quad (2.87)$$

Де $dfz_{nepi} = A_{nep} \cdot z_{nepi} + B_{nep} \cdot r_{nepi} + D_{nep}$, $dfr_{nepi} = r_{nepi} + B_{nep} \cdot z_{nepi} + C_{nep}$.

2.2.7 Визначення довжини середньої лінії і твірних втулкової і периферійної поверхонь

Для побудови графіків розподілу швидкостей і тисків (рис.2.11 і рис. 2.12) по довжині каналу необхідно визначити довжину середньої лінії каналу (використовується при складанні алгоритму комп'ютерної програми):

$$l_{cp} = \sum_{i=1}^{N_1} \Delta l_{cpi}, \quad (2.88)$$

де N_1 - кількість ортогоналей,

l_{cpi} - довжина середньої лінії між сусідніми ортогоналями.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta l_{cpi} = \sqrt{\Delta z_i^2 + \Delta r_i^2}, \quad (2.89)$$

де Δz_i - збільшення довжини по осі z;

Δr_i - збільшення довжини по осі r.

Аналогічно визначаються довжини твірних втулкової і периферійної поверхонь, які використовуються для побудови графіків розподілу швидкостей і тисків уздовж цих поверхонь.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

3 РОЗРАХУНОК ТЕЧІЇ В ОСЕРАДІАЛЬНИХ КАНАЛАХ

3.1 Програма для проектування осерадіальних каналів

Згідно з наведеною вище методики створена програма «TurbocompressorCAD ukr», що дозволяє автоматизовано виконувати проектування осерадіальних каналів і розрахунок течії в них.

Використовувалася графічна оболонка програми «TurbocompressorCAD v.1.0 », розроблена І. В. Гавриченко в середовищі програмування Delphi 7 [4].

Програма має зручний інтерфейс і високу швидкість розрахунку. На кожному етапі розрахунку в лівому вікні наводяться розрахункові залежності і числові значення визначених величин, в правому - графічне пояснення для операцій, що виконуються на даній стадії, або результат обчислень у вигляді схем або графіків.

Вихідними даними для розрахунку є геометричні параметри перетину каналу на вході і виході, довжина каналу, теплофізичні параметри і швидкість газу на вході, а також закон зміни площі поперечного перерізу каналу.

За підсумками розрахунків автоматично будується меридіональний контур каналу (рис. 3.1), потім в наступному кроці програми будуються ортогоналі до середньої лінії каналу рис. 3.2).

Кінцевим результатом розрахунку є графіки розподілу меридіональної складової швидкості (для заданого числа ліній течії) за довжиною каналу (рис. 3.3) і графіки розподілу тисків (для заданого числа ліній течії) за довжиною каналу (рис. 3.4).

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Графіки зміни меридіональних швидкостей уздовж втулкової і периферійної поверхонь (зображені на рис. 2.11 червоним і жовтим кольором відповідно) дозволяють оцінити характер течії і можливість відриву потоку.

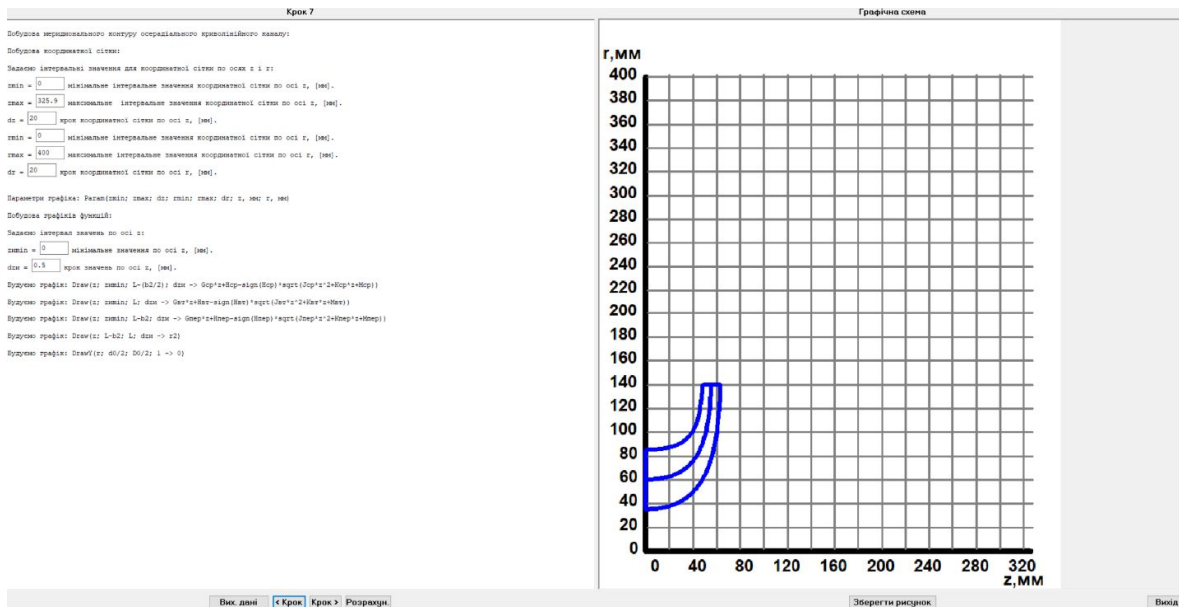


Рисунок 3.1 - Побудова меридіонального контуру каналу в програмі

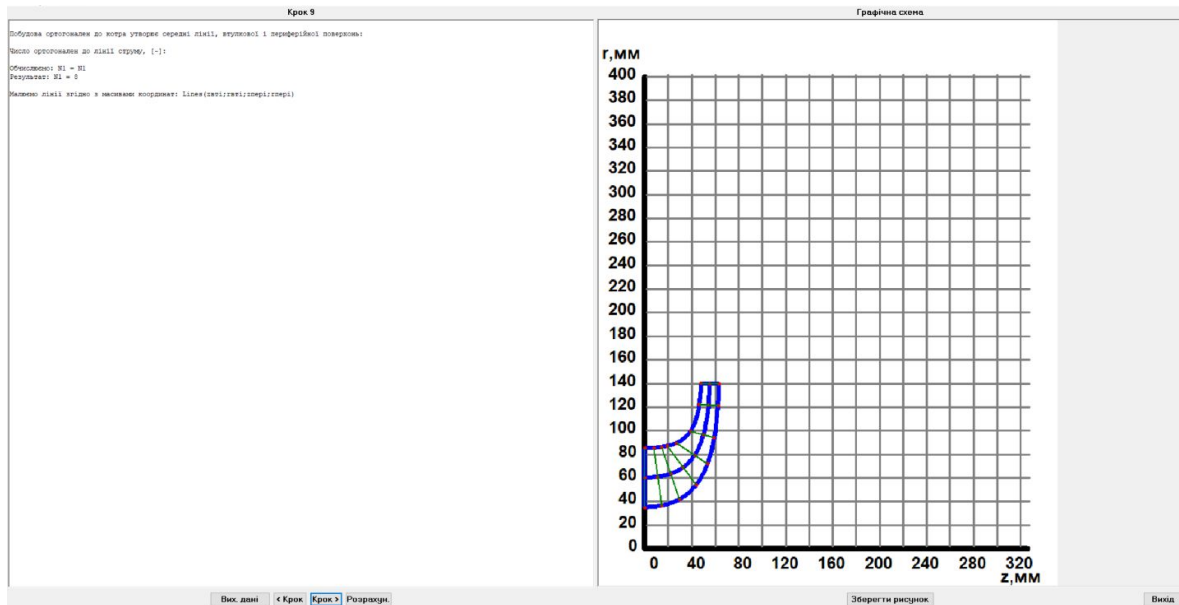


Рисунок 3.2 - Побудова ортогоналей до середньої лінії в програмі

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 10.00.00.00 ПЗ.

Лист

49

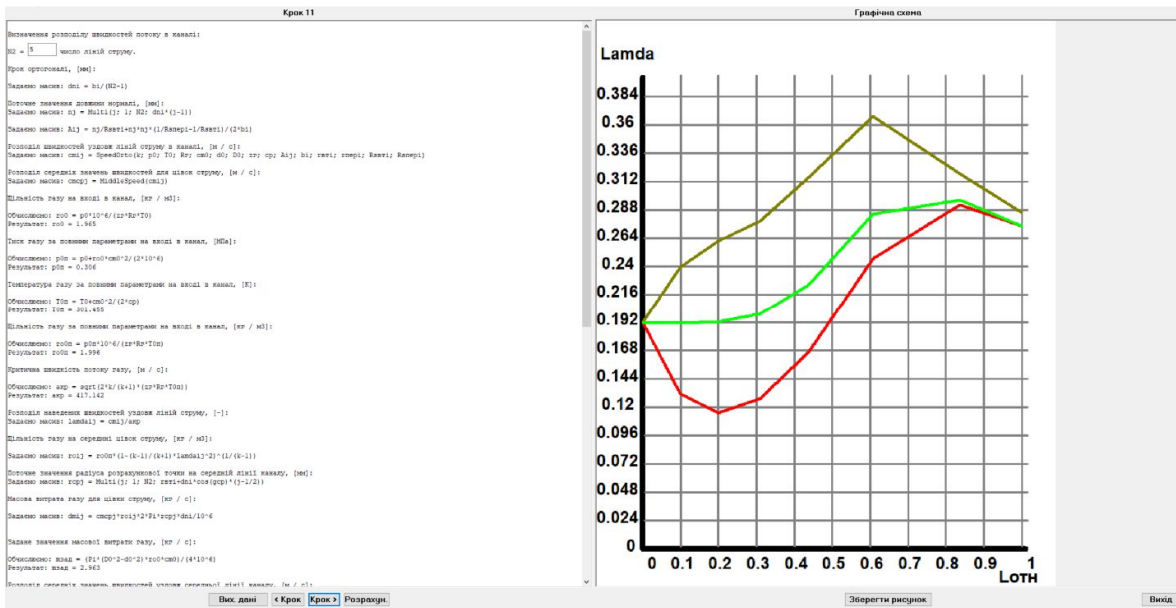


Рисунок 3.3 - Графіки зміни наведених швидкостей уздовж каналу для різних ліній течії в програмі

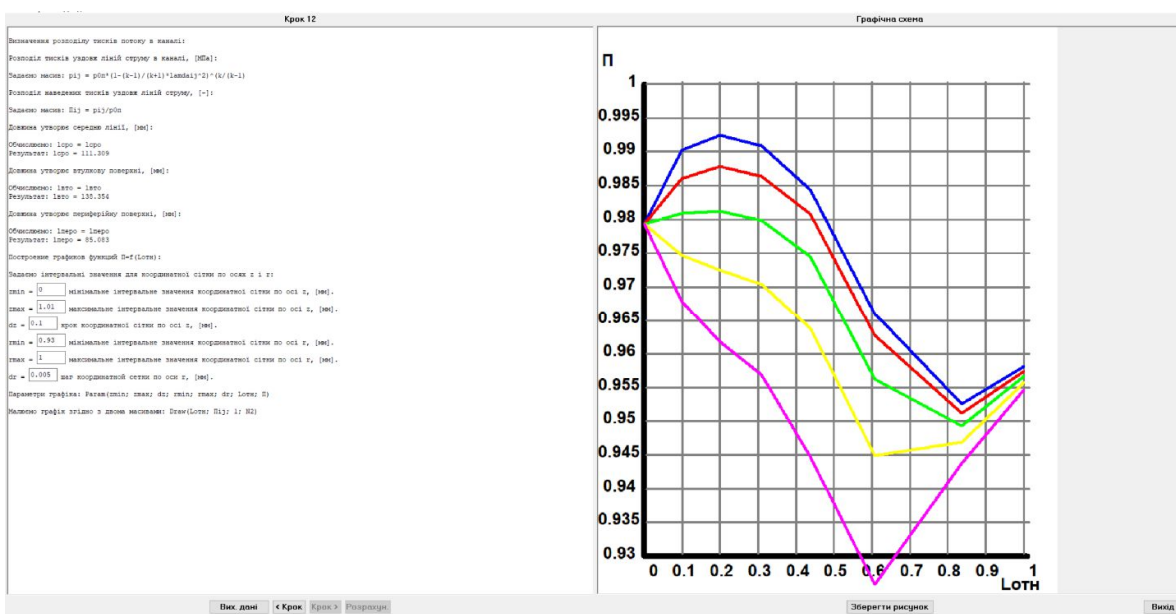


Рисунок 3.4 - Графіки зміни газодинамічних функцій тиску уздовж каналу для різних ліній течії в програмі

При безвідривної течії можливе зменшення осьових розмірів каналу. Як відомо, канали турбокомпресорів бажано конструювати з найменшими осьовими розмірами.

Також після оцінки графіків розподілу швидкостей і тисків можна здійснити повернення до режиму введення вихідних даних з метою скорегувати їх для отримання більш сприятливого розподілу параметрів в каналі, що може підвищити ефективність машини в цілому.

Для наближеної оцінки відриву потоку від криволінійної поверхні можливе використання ступеня дифузорності $k_{\text{диф}} = \frac{c_{\text{max}}}{c_{\text{min}}}$, яка визначається як відношення максимальної швидкості нев'язкого потоку (тобто на межі примежового шару і нев'язкого ядра потоку) до найменшої для дифузорної ділянки течії газу (по аналогії з \dot{c}_s згідно [1]). При цьому відрив можливий при $k_{\text{диф}} > 1,8$.

3.2 Вихідні дані

$$D_2 = 280 \text{ мм};$$

$$b_2 = 12 \text{ мм};$$

$$D_0 = 170 \text{ мм};$$

$$d_0 = 70 \text{ мм};$$

$$\gamma_{0cp} = 1 \text{ град};$$

$$\gamma_{2cp} = 88 \text{ град};$$

$$\gamma_{0em} = 1 \text{ град};$$

$$\gamma_{2em} = 89 \text{ град};$$

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
						51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\gamma_{0пер} = 1 \text{ град};$$

$$\gamma_{2пер} = 87 \text{ град};$$

$$f_2 = -1; -0,5; 0; +0,5; +1$$

$$c_0 = 50; 60; 70; 80; 90; 100 \text{ м/с};$$

$$p_0 = 0,3 \text{ МПа};$$

$$T_0 = 300 \text{ К};$$

$$z = 0,994;$$

$$R = 512 \text{ Дж/кгК};$$

$$c_p = 2200 \text{ Дж/кгК};$$

$$k = 1,31.$$

3.3 Результати розрахунків

За допомогою розробленої програми виконані розрахунки течії газу відповідно до вихідних даних.

Графіки для каналу з коефіцієнтом площі $f_2 = -1$ вказані на рис. 3.5. Для даного випадку спостерігається досить сильна дифузорність течії газу на втулкової поверхні в першій половині каналу.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		52

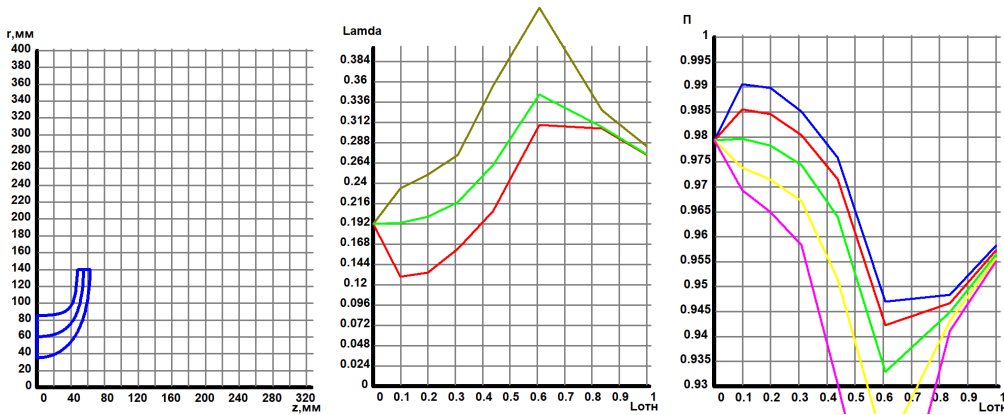


Рисунок 3.5 - Результати розрахунку в'язкого потоку в каналі при $f_2 = -1$

Графіки для каналу з коефіцієнтом площі $f_2 = -0.5$ вказані на рис. 3.6. Для даного випадку спостерігається досить сильна дифузійна течія газу на втулкової поверхні в першій половині каналу.

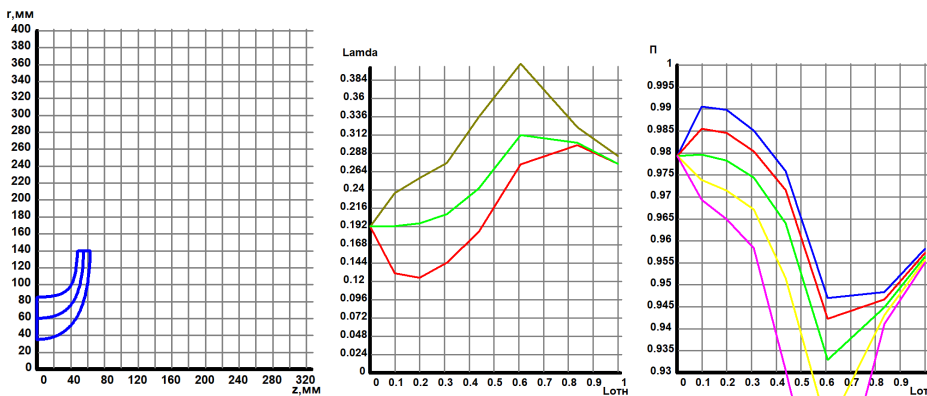


Рисунок 3.6 - Результати розрахунку в'язкого потоку в каналі при $f_2 = -0.5$

Схема каналу і графіки при лінійному законі зміни площі (при $f_2 = 0$) вказані на рис. 3.7. На всіх графіках червоним кольором позначено зміна відповідного параметра (наведеної швидкості або газодинамічної функції

тиску) на втулкової поверхні, жовтим - на периферійній, зеленим - уздовж середньої лінії, синім кольором вказано зміна середньовитратної швидкості.

Для даного випадку уповільнення потоку здійснюється досить рівномірно, що обумовлено саме лінійним законом зміни площі. Зростання швидкості на периферійній поверхні на початковій ділянці обумовлено великим радіусом кривини на цій ділянці.

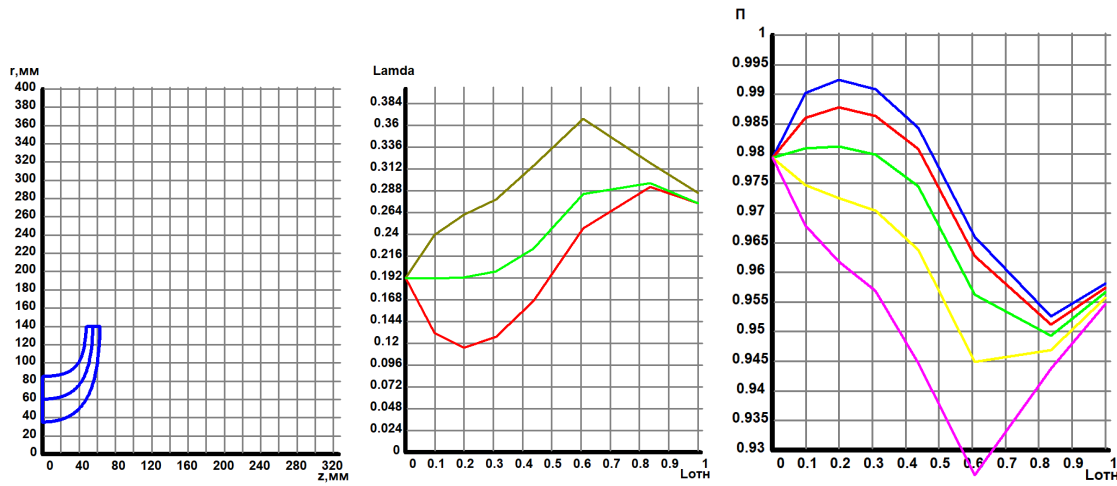
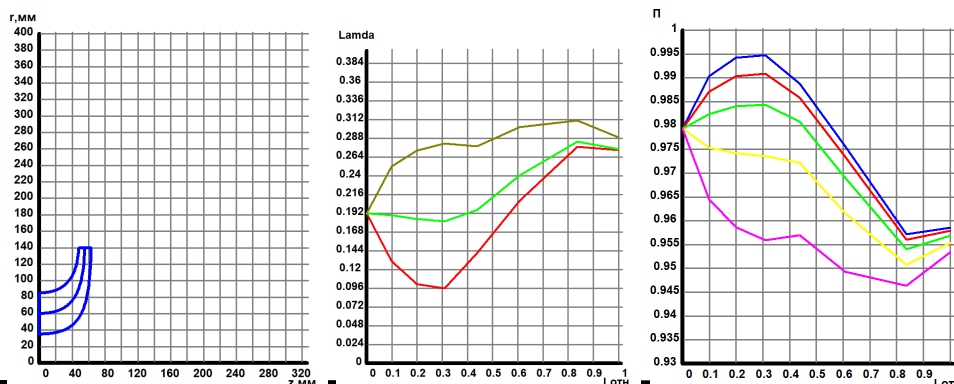


Рисунок 3.7 - Результати розрахунку в'язкого потоку в каналі при $f_2 = 0$

Графіки для каналу з коефіцієнтом площі $f_2 = 1$ вказані на рис. 3.8. Для даного випадку спостерігається досить сильна дифузорність течії газу на втулкової поверхні в першій половині каналу.



Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

КМ 10.00.00.00 ПЗ.

Лист

54

Рисунок 3.8 - Результати розрахунку в'язкого потоку в каналі при $f_2 = 1$

При $f_2 = 1.5$ дифузорність течії на тій же ділянці збільшується (рис. 3.9).

В даному випадку є ймовірність відриву потоку. значення $k_{diff} \approx 1,9 > 1,8$,

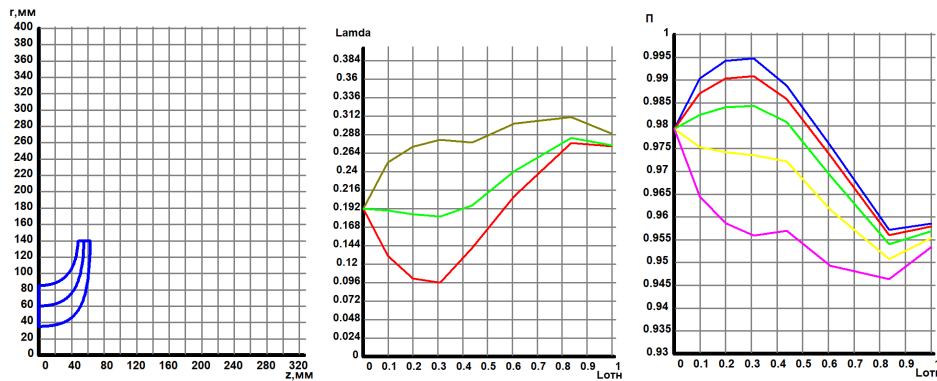


Рисунок 3.9 - Результати розрахунку в'язкого потоку в каналі при $f_2 = 1,5$

Можна помітити, що найбільш сприятливий характер має протягом в каналі з рівномірним законом зміни площі. В цілому, спостерігається безвідривний характер течії. Тому є можливість оптимізувати канал зменшивши його осьові габарити.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Небезпечні і шкідливі фактори компресорного виробництва

Основні небезпечні та шкідливі чинники компресорного устаткування:

- обертові частини;
- дію предметів, які розлітаються в результаті вибуху, або від значних статичних і динамічних навантажень (тиск газу або повітря, статичні і циклічні навантаження, вібрація);
- підвищена температура поверхні компресора і трубопроводів;
- віброшумове вплив на працюючих;
- порушення чистоти повітря робочої зони (при наявності витоків газу і викиду відпрацьованих газів приводом);
- електромагнітний вплив на працюючих;
- підвищене значення напруги в електромережі, коротке замикання при якому електричний струм проходить через тіло людини;
- підвищена рухливість повітря;
- гострі кромки на поверхні деталей і інструменту.

Надійність і безпека обладнання закладається при його проектуванні, забезпечується при виготовленні, контролюється при експлуатації і відновлюється при ремонті.

Проектування, виготовлення, монтаж, налагодження, ремонт, випробування та експлуатація компресорного устаткування повинні проводитися підприємствами, які мають дозвіл на відповідний вид діяльності, яке видає Держнаглядохоронпраці України.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Відповідно с законом «Про охорону праці», державний нагляд поширюється на проектні, проектно-конструкторські та науково-дослідні організації, машинобудівні і приладобудівні підприємства (незалежно від їх організаційно-правових форм) в частині забезпечення ними технологічності, надійності і якості виготовленого обладнання та приладів, раптова відмова яких при експлуатації може призвести до аварій, важких екологічних наслідків та людських жертв. Нагляду підлягає проектна та конструкторська документація, вироби машинобудування (машини, апарати, судини, технологічні трубопроводи, трубопровідна арматура, складальні одиниці, елементи, деталі). До переліку піднаглядний продукції входять також прилади контролю та регулювання технологічних процесів,

Обладнання повинно відповідати встановленим вимогам технічної безпеки, загальних правил вибухо- і пожежобезпеки виробничих комплексів, правилам будови і безпечної експлуатації повітряних чи газових компресорів. Під час роботи компресорної установки слід контролювати:

- а) тиск і температуру стисненого газу після кожного ступеня стиснення;
- б) температуру стисненого газу після холодильників;
- в) безперервність надходження в компресори і холодильники охолоджуючої води;
- г) температуру охолоджуючої води, що надходить і виходить із системи охолодження по точках;
- д) тиск і температуру масла в системі змащення;
- е) величину струму статора, а при синхронному електроприводі - струму ротора електродвигуна.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		57

Показання приладів через встановлені інструкцією проміжки часу, але не рідше ніж через дві години, повинні реєструватися в журналі обліку роботи компресора.

ВИСНОВОК

У представленій роботі виконано наступне:

- розроблена методика проектування и розрахунку течії в осерадіальних осесиметричних каналах;
- створена комп'ютерна програма для автоматизованого проектування осерадіальних каналів і розрахунку течії в них;
- виконані розрахунки течії для заданих вихідних даних та проведено аналіз результатів.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		58

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Теорія і розрахунок турбокомпресорів: Учеб. посібник для студентів вузів машинобудівних спеціальностей. / К.П.Селезнев, Ю.Б.Галеркін і ін .; під загальною редакцією К.П.Селезнева. - 2-е изд., Перераб. і доп. - Л .: машинобудування, Ленінгр. отд-ня, 1986. - 392с., мул.

2. Селезньов К.П., Галеркіну Ю.Б. Відцентрові компресори.- Л .: Машинобудування. Ленінградське відділення, 1982. 271 с., Мул.

3. R. Puzyrewski, P. Flaszynski. Hyperbolically shaped centrifugal compressor // J. of Thermal Science. - 2003. - Vol.12, №3.

4. Калінкевіч М.В., Гавриченко І.В. Проектування осерядіальних каналів турбомашин: Навчальний посібник. - Суми: Вид-во СумДУ, 2008. - 161с.

					КМ 10.00.00.00 ПЗ.	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59