

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

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

здобувача за другим (магістерським) рівнем вищої освіти  
за освітньо-професійною програмою  
«Компресори, пневмоагрегати та вакуумна техніка»  
зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»  
на тему «Система сухих газових ущільнень для  
відцентрового компресора природного газу»

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

Завідувач кафедри

С.М. Ванєєв

Керівник роботи

Г.А. Бондаренко

Консультант з охорони праці

В.В. Фалько

Здобувач

В.С. Сітало

Суми 2023

Зміст	
Вступ.....	4
1. Конструкція та принцип роботи системи сухих газових ущільнень.....	8
1.1. Принцип роботи сухих газових ущільнень.....	8
1.2. Форми газодинамічних каналок.....	15
1.3. Конструктивні схеми сухих газових ущільнень.....	18
1.3.1. Основне ущільнення.....	18
1.3.2. Роздільне ущільнення.....	22
1.3.3. Ущільнення технологічної частини.....	25
1.4. Матеріальне виконання сухих газових ущільнень.....	27
1.5. Конструкція та призначення контрольно-вимірювальної панелі.....	37
1.6. Мета роботи.....	40
2. Розрахунково-конструкторська частина.....	41
2.1. Вибір конструкції та матеріалів вузлів СГУ.....	42
2.2. Функціональні та конструктивні вимоги до КВП СГУ.....	46
2.3. Розрахунок сухого газового ущільнення.....	48
2.3.1. Основні рівняння руху в'язкого газу.....	50
2.3.2. Основні припущення.....	51
2.3.3. Розрахунок розподілу тисків газу вздовж радіуса в зазорі ущільнювальної пари.....	52
2.3.4. Визначення витрати газу через ущільнення.....	54
2.3.5. Визначення несучої здатності та жорсткості газового шару.....	54
2.3.6. Визначення потужності газодинамічного тертя.....	54
2.3.7. Визначення теплоти ізотермічного процесу розширення газу.....	55
2.3.8. Проведення розрахунків.....	55
3. Технологічний розділ.....	60
3.1. Аналіз службового призначення деталі.....	60
3.2. Розрахунок припусків і розмірів заготовки.....	60

					<i>КМ 14.00.00.00 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Сітало</i>			Система сухих газових ущільнень для відцентрового компресора природного газу	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Бондаренко</i>					<i>2</i>	<i>83</i>
<i>Реценз.</i>		<i>Пшеничний</i>				<i>СумДУ Гр-К.м-21</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Шарапов</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Ванєєв</i>						

3.3. Розробка маршрутної технології.....	61
4. Розділ автоматизації для проектованого обладнання .....	62
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	66
5.1. Аналіз шкідливих факторів під час роботи ГПА на основі ВК і ГТП ...	66
5.1.1. Основний перелік заходів безпеки під час роботи та обслуговування ГПА.....	66
5.1.2. Заходи щодо зниження шуму і вібрацій.....	71
5.1.3. Запобіжні пристрої від підвищення тиску .....	72
5.1.4. Заземлення компресорних установок.....	75
5.2. Розрахунок захисного заземлення .....	76
Висновок .....	80
Список використаної літератури .....	82

					<i>КМ 14.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		3

## *Вступ*

Відцентрові компресорні машини набули широкого поширення в хімічній, нафтовій і газовій промисловості.

Відцентрові компресори у складі технологічних установок незамінні під час виробництва високоякісного бензину і мастильних матеріалів, переробці вуглеводнів та їхніх похідних, виробництва добрив, транспортуванні та зріджуванні природного газу. Застосування відцентрових компресорів у виробничих циклах підвищеної небезпеки висуває суттєві вимоги до надійності їхніх окремих вузлів і агрегату загалом [1].

За даними, наведеними авторами [2] найбільш слабкими вузлами турбомашин є опорно-ущільнювальні системи роторів. У відцентрових насосах і компресорах близько 16% усіх несправностей становить вихід з ладу опорних підшипників, а майже 40-80% відмов і виробничих втрат відбувається через вихід з ладу ущільнень, при цьому кількість відмов зростає в міру збільшення потужності відцентрових компресорів.

До кінця ХХ століття як кінцеві ущільнення роторів відцентрових компресорів найбільше застосування мали безконтактні радіально-щілинні ущільнення з плаваючими кільцями і підведенням затворної рідини, гідростатичні ущільнення, і торцеві ущільнення з масляним затвором.

Система забезпечення циркуляції ущільнювального мастила, що містить маслбак, фільтри, мастиловловлювачі, насоси високого тиску, арматуру і теплообмінники, істотно ускладнює конструкцію відцентрового компресора і призводить до подорожчання агрегату в цілому.

Вищезгадані типи ущільнень мають ряд недоліків. Загальновизнаними недоліками систем масляних ущільнень є такі [3]:

- при відносній дешевизні самих ущільнень ціна ущільнень із усією системою забезпечення їх працездатності (фільтри, маслопастки, насоси, арматура, ємності, теплообмінники і т.п.) складає до 20-40% від вартості компресора;

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- громіздкість і складність системи в цілому, значні витрати на обслуговування і забезпечення працездатності (споживання масла приблизно 20-200 л/доб);

- енергоспоживання системи для забезпечення потоку масла (7-25 м<sup>3</sup>/год на один корпус) потрібна потужність близько 15-75 кВт, втрати на тертя масляних ущільнень - ще близько 3-15 кВт;

- втрати виробництва через простої компресора на обслуговування і ремонт системи ущільнень;

- необхідність дублювання більшості елементів системи, оскільки відмова будь-якого елемента системи призводить до виходу із ладу ущільнення;

- втрати робочого газу, включаючи розчинення в ущільнювальному маслі (10-50 м<sup>3</sup>/год);

- для токсичних і корозійних газів потрібна подача інертного газу в кількості 15-40 м<sup>3</sup>/год;

- обмежений ресурс.

Дотримуючись нових вимог замовників, виробники компресорного устаткування також прагнуть до модернізації і удосконалення машин, що випускаються. Мета такої модернізації – підвищення продуктивності і безпеки устаткування для обслуговуючого персоналу і навколишнього середовища.

Подібні удосконалення висувають підвищені вимоги до культури виробництва машин та їхньої експлуатації.

Крім того, в наш час значну увагу приділяють створенню безпечних і екологічно нешкідливих виробництв. З цією метою проводиться модернізація існуючої техніки або придбання нової, що відповідає останнім вимогам безпеки [3].

Перераховані вище недоліки системи кінцевих ущільнень корпусу стиснення відцентрового компресора можна виключити застосуванням системи "сухих" газодинамічних ущільнень (СГУ), які не вимагають

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

громіздкої та енергоємної системи забезпечення працездатності.

Системи СГУ є найсучаснішими ущільненнями валів турбомашин. Системи сухих газових ущільнень можуть застосовуватися практично на будь-якому устаткуванні, де існує потреба в герметизації валів, що обертаються.

Застосування СГУ обумовлено низкою економічних та екологічних переваг у порівнянні з традиційними системами кінцевих ущільнень валів:

- виключення втрат масла, що забирається в проточну частину;
- виключення втрат, пов'язаних із заміною масла, що стало непридатним;
- зменшення в кілька десятків разів втрат робочого газу через припинення його скидання з маслопасток і дегазаторів;
- зменшення плати за викиди (нормативні та наднормативні);
- підвищення якості робочого газу за рахунок виключення вмісту в ньому масла;
- припинення енерговитрат на функціонування насосів ущільнювального масла;
- припинення енерговитрат на дегазацію масла;
- зменшення втрат часу на обслуговування системи ущільнення;
- зменшення втрат часу на простий обладнання з вини ущільнень;
- зниження втрат від перевитрати енергії та газу при позапланових зупинках з вини ущільнень;
- підвищення екологічної чистоти;
- покращення умов експлуатації;
- підвищення пожежної та вибухобезпеки.

Провідні світові виробники турбомашин комплектують нові компресори сухими ущільненнями, а багато виробництв, що експлуатують старі машини, проводять їх модернізацію шляхом заміни масляних ущільнень сухими.

Початок широкого виробництва та використання сухих газових ущільнень зі спіральними канавками можна віднести до кінця 80-х років, коли 10 травня 1987 року минув термін дії патенту фірми «John Crane»

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

(Великобританія) [4]. В даний час такі ущільнення виготовляють і постачають фірми «John Crane» (Великобританія), «Flowserve» (США), «EagleBurgmann» (Німеччина) та інші.

На території колишнього СРСР над проблемою створення систем сухих газових ущільнень для компресорів у складі газоперекачування працював колектив інженерів Всесоюзного науково-дослідного інституту компресорного машинобудування (ВНДІкомпресормаш). В результаті їхньої роботи були створені перші зразки ущільнень, які були встановлені та випробувані на КС «Сизрань-2» й в подальшому успішно експлуатувалися. На території України в даний час виробництвом сухих газових ущільнень займається науково-виробнича фірма «Грейс-інжиніринг», яка знаходиться в місті Суми.

На сьогоднішній день компанія реалізує серійне постачання систем сухих газових ущільнень як для вітчизняних виробників, так і розвиває співробітництво із газотранспортними компаніями країн далекого зарубіжжя. Інженерами фірми постійно проводяться дослідження та удосконалення ущільнювальної техніки. Результатом таких робіт стало промислове виготовлення вузлів СГУ компресорів високого тиску.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# **1. Конструкція та принцип роботи системи сухих газових ущільнень**

Система сухих газових ущільнень складається з сухих газових ущільнень, які забезпечують герметизацію валу компресора, та контрольно-вимірювальної панелі, яка в свою чергу забезпечує та контролює умови нормальної експлуатації сухих газових ущільнень.

## **1.1. Принцип роботи сухих газових ущільнень**

Зовнішнє безконтактне сухе газове ущільнення (рис. 1.1) побудоване за принципом традиційного механічного ущільнення і має ті самі основні деталі і вузли - обертове ущільнювальне кільце, сідло, пружини, вторинні ущільнення (О- кільця), втулки і т.п. Принципова відмінність полягає у канавках глибиною приблизно 1-8 мкм, виконаних на обертовому кільці тертя з боку зовнішнього діаметра, які займають близько 50% робочої поверхні кільця. Частина поверхні обертового кільця, що розміщена з боку внутрішнього діаметра і не має канавок, називається дамбою. Канавки і дамба є головними факторами в роботі безконтактного ущільнення, і вони забезпечують дві комбіновані функції [3]:

- гідростатичне відкриття пари тертя від дії тиску робочого газу без обертання вала;
- гідродинамічне відкриття пари тертя (звичайно на 2-5 мкм) за рахунок підвищення тиску і створення в зоні дамби шару газового змазування через звуження дамбою потоку газу, що йде від канавок. У зоні початку дамби відбувається підвищення температури (і в'язкості) газу, що принципово для стабільності газового змащування. Правильно розраховане і виготовлене безконтактне ущільнення є стабільною саморегулювальною системою, досить стійкою до змін робочих параметрів.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8



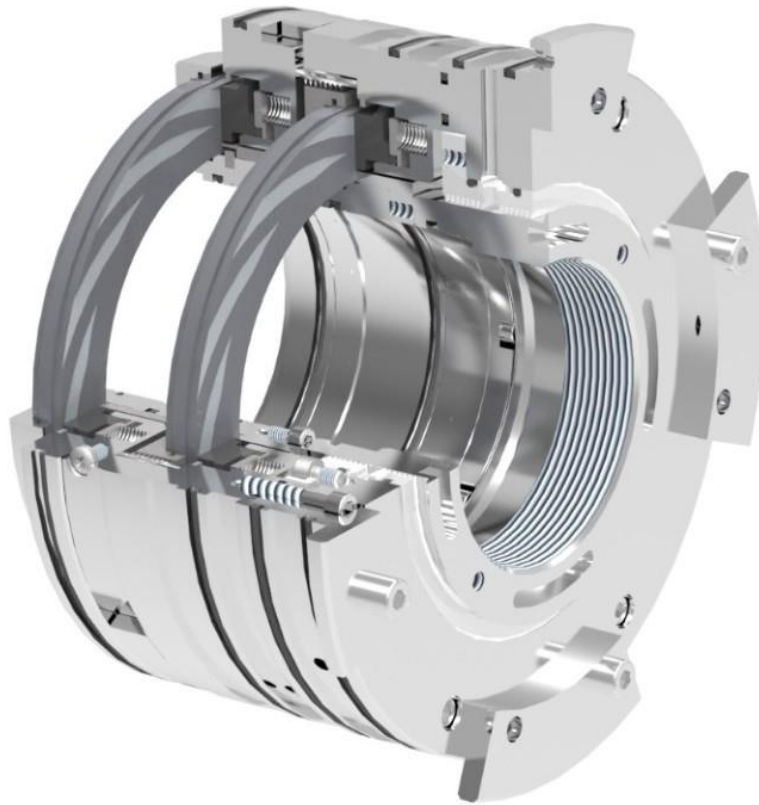


Рис. 1.1 – Сухе газове ущільнення

Основною робочою частиною ущільнення є ущільнювальна пара: торець поз.7 і сідло поз.6 (рис.1.2). Торець може рухатися в осьовому напрямку, він закріплений усередині корпусу ущільнення поз.11 від прокручування і притискається до сідла пружинами поз.12 через обойму поз.8. Сідло, яке обертається разом з ротором, закріплене за допомогою роторних втулок поз.3 і поз.15 і гайки поз.16 на валу компресора поз.1. Роторні втулки поз.3 і поз.15 з'єднані гвинтами, поз.14. Корпус ущільнення поз.11 встановлений у корпусі компресора поз.5 і зафіксований у ньому. Ущільнювальні кільця поз.2, 4, 9 і 13 виконані з гуми круглого поперечного перерізу.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

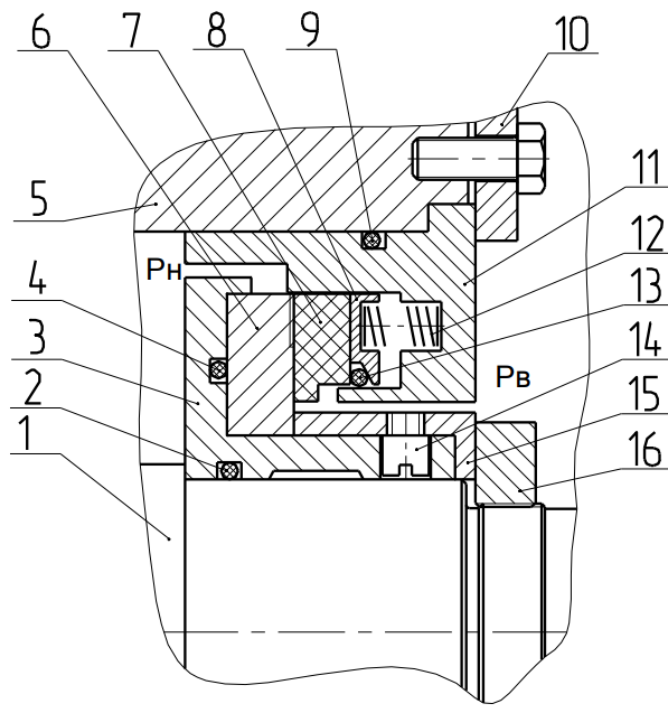


Рис. 1.2 - Конструкція ущільнювальної ступені вузла СГУ

На торці сідла поз.6 виконані спіральні канавки глибиною  $\delta_{сп}$  у декілька мікрометрів (рис.1.3), які розташовані рівномірно по колу між радіусами  $R_H$  і  $R_{сп}$ .

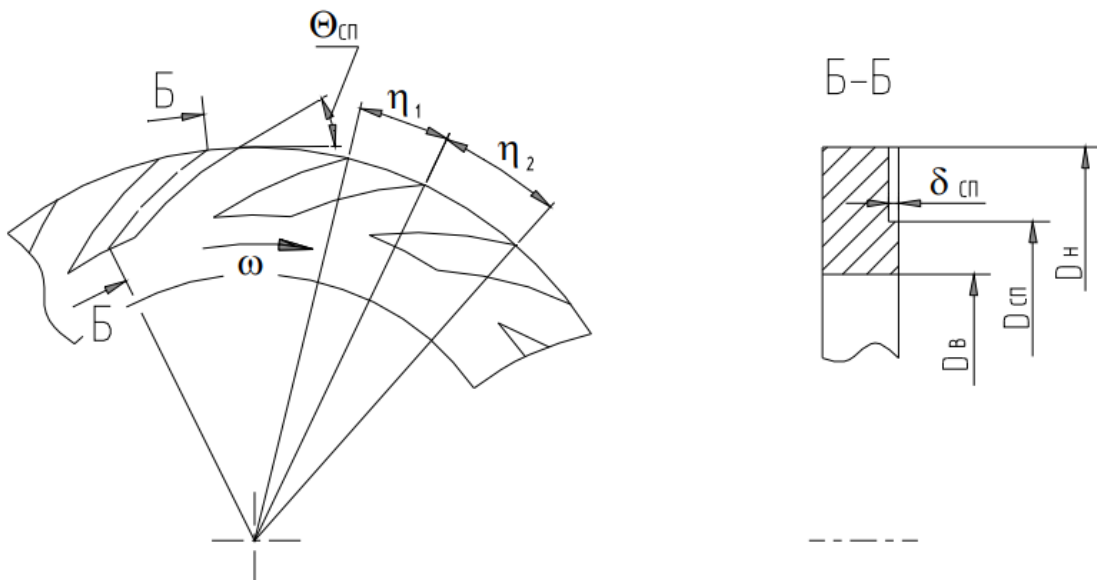


Рис. 1.3 – Сідло зі спіральними канавками

Осьове положення торця поз.7 визначається умовою його рівноваги під дією сил тиску газу і пружин (рис.1.4).

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

При необерттовому роторі зазор між торцем і сідлом  $\delta_1 \approx 0$ . На рис.1.4 показані епюри тисків і схема сил, що діють на торець при необерттовому роторі.

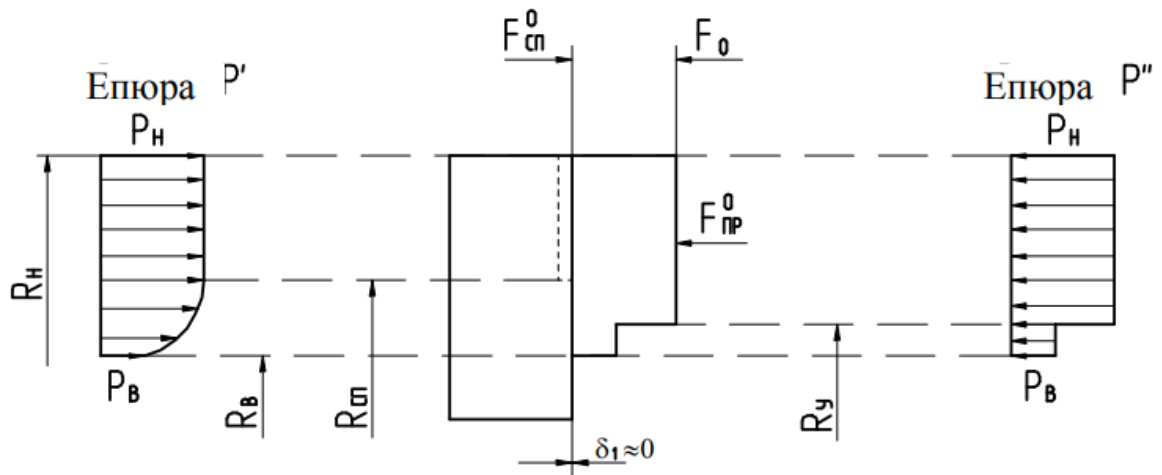


Рис.1.4 – Епюри тисків і схема сил, що діють на торець при необерттовому роторі

З боку сідла на торець діє сила:

$$F_C = \int_{R_B}^{R_H} p' \cdot 2\pi \cdot r \cdot dr \quad (1.1)$$

На ділянці сідла зі спіральними канавками між  $R_H$  і  $R_{СП}$  тиск  $p' = p_H$ . На гладкій ділянці сідла між  $R_{СП}$  і  $R_B$  тиск  $p'$  можна визначити за формулою:

$$p'_{СП} = \sqrt{\left( P_B^2 + (P_H^2 - P_B^2) \cdot \frac{\ln(r/R_B)}{\ln(R_{СП}/R_B)} \right)} \quad (1.2)$$

Тоді:

$$F_C^0 = \pi \cdot (R_H^2 - R_{СП}^2) \cdot P_H + 2\pi \cdot \int_{R_B}^{R_{СП}} p'_{ГЛ} \cdot r \cdot dr \quad (1.3)$$

З протилежного боку на торець діє сила:

$$F_0 = \pi \cdot (R_H^2 - R_У^2) \cdot P_H + \pi \cdot (R_У^2 - R_B^2) \cdot P_B + F_{ПР}^0 \quad (1.4)$$

де  $F_{ПР}^0$  – сила попереднього стиску пружин на величину  $\delta_{ПР}^0$ .

Умова рівноваги торця  $F_C^0 = F_0$ :

$$\pi \cdot (R_H^2 - R_{\text{СП}}^2) \cdot P_H + 2\pi \cdot \int_{R_B}^{R_{\text{СП}}} P'_{\text{ГЛ}} \cdot r \cdot dr =$$

$$= \pi \cdot (R_H^2 - R_Y^2) \cdot P_H + \pi \cdot (R_Y^2 - R_B^2) \cdot P_B + F_{\text{ПР}}^0 \quad (1.5)$$

Зусилля пружин повинне бути невеликим:

$$F_{\text{ПР}}^0 = 2\pi \cdot \int_{R_B}^{R_{\text{СП}}} P'_{\text{ГЛ}} \cdot r \cdot dr - \pi \cdot (R_{\text{СП}}^2 - R_Y^2) \cdot P_H - \pi \cdot (R_Y^2 - R_B^2) \cdot P_B \quad (1.6)$$

При обертанні ротора газ захоплюється канавками і нагнітається до внутрішнього діаметра канавки. У цьому місці потік газу зустрічається з ущільнювальною перегородкою, яка створює опір потоку, що призводить до збільшення тиску  $p'$  між сідлом і торцем. В наслідок цього збільшуються сила  $F_C$  і відбувається віджимання торця, він "спливає" на газовому шарі. Встановлюється ущільнювальний зазор  $\delta_1$  величиною кілька мікронів, через який дроселюється мала кількість робочого газу.

Епюри тисків і схема сил, що діють на торець (при обертанні ротора), показані на рис. 1.5.

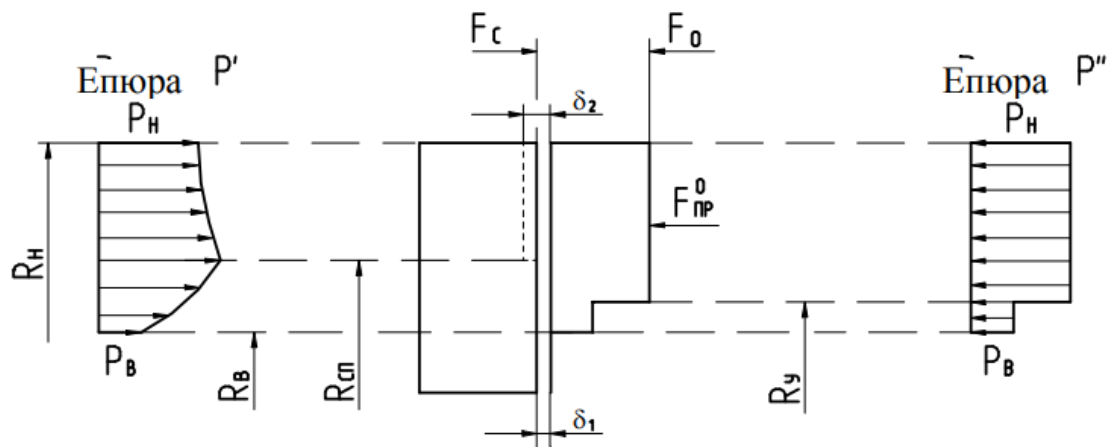


Рис.1.5 – Епюри тисків і схема сил, що діють на торець при обертанні ротора

Силу пружин можна знайти з умови рівноваги торця  $F_C = F_0$ :

$$F_{\text{ПР}} = F_C - \pi \cdot (R_H^2 - R_Y^2) \cdot P_H - \pi \cdot (R_Y^2 - R_B^2) \cdot P_B \quad (1.7)$$

Сумарну жорсткість усіх пружин  $K_{\text{ПР}} = k_{\text{ПР}} \cdot n_{\text{ПР}}$  можна знайти за формулою:

									Арк.
									12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

$$F_{\text{ПР}} = \frac{F_{\text{ПР}} - F_{\text{ПР}}^0}{\partial_1} \quad (1.8)$$

або:

$$F_{\text{ПР}} = \frac{1}{\partial_1} \left[ F_C - \pi \cdot (R_H^2 - R_{\text{СП}}^2) \cdot P_H - 2\pi \cdot \int_{R_B}^{R_{\text{СП}}} P'_{\text{ГЛ}} \cdot r \cdot dr \right] \quad (1.9)$$

Із наведених залежностей бачимо, що на рівновагу діючих в ущільненні сил впливають значення  $R_y$  та  $R_{\text{СП}}$ , а також характер зміни тиску  $p'$  у зазорі між сідлом і торцем.

Важливим критерієм оцінки експлуатаційної надійності ущільнення на газовому змащенні є стабільність ущільнювальних зазорів та їх форма. Ідеальна форма зазору – плоскопаралельна. Але під дією тиску та температури змінюється форма кілець пари тертя, що призводить до зміни геометрії зазору. Під дією силових та температурних деформацій під час роботи встановлюється V-подібна (збіжна) або A-подібна (розбіжна) форма зазору.

Збіжний профіль зазору є додатною конусністю, тоді як розбіжний профіль - від'ємна конусність. Збільшення позитивної конусності  $\Delta h$  призводить до розкриття ущільнення, в той час як збільшення від'ємної конусності (абсолютна величина) призводить до контакту між ущільнювальними кільцями. Сухий газ ущільнення працює у вузькому діапазоні деформацій від 0 до 5 мкм. Якщо позитивне значення  $\Delta h$  перевищує 5 мкм, то канавки не працюватимуть.

На рис.1.6 показані характеристики ущільнюючого зазору різної форми. Збіжні форми відрізняються низьким рівнем витoku ущільнення (в межах 0,5 - 0,75 г/с), а також високими значеннями жорсткості (7300 - 7600 Н/м). Розбіжні форми забезпечують більш ніж удвічі нижчий рівень герметичності ущільнення (1,0 - 1,75 г/с) і низьку жорсткість, яка відрізняється від жорсткості збіжних форм в 1,5 - 5 разів і становить в абсолютному значенні 1500 - 4700 Н/м. Максимальна жорсткість розглянутих форм відповідає формам В, С, D і Е. Остання з них Е навіть дещо вища за жорсткість плоскопаралельної форми (без деформацій). Порівняно з плоскопаралельною формою форми В, С і Е

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

мають дещо більші витоки (витік на 15% вище, ніж для плоскопаралельної форми). З такими формами легше забезпечити робочу конструкцію, оскільки ці форми допускають наявність певної деформації ущільнювальних поверхонь ущільнення. Рекомендується вибирати форму зазору зі збіжним профілем для відповідного режиму роботи.

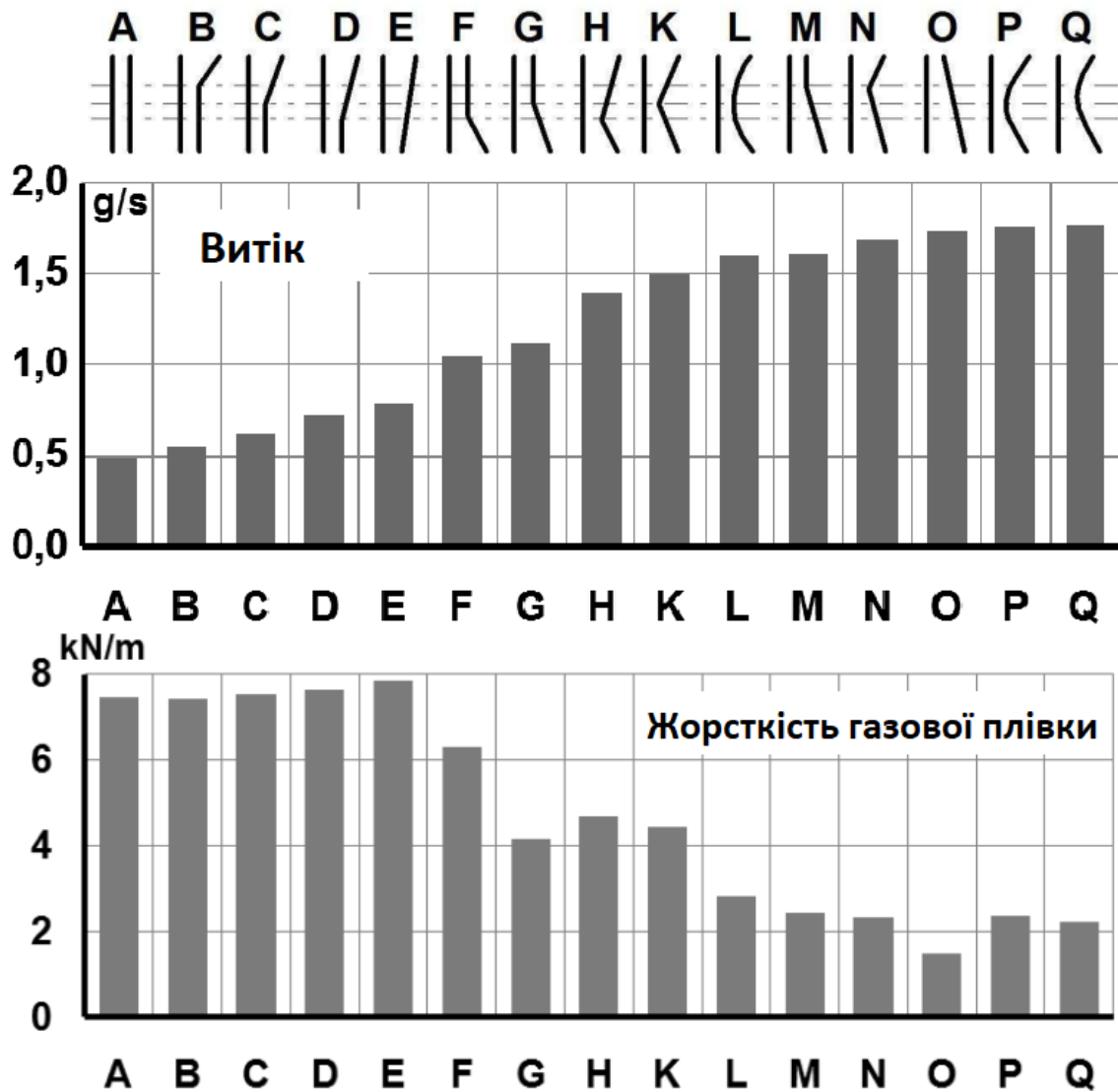


Рис. 1.6 – Порівняння форм поверхні з однаковим мінімальним зазором ( $h_{\min} = 1 \text{ мкм}$ ) і однаковим максимальним зміщенням точок на поверхні кільця ( $\Delta h = 5 \text{ мкм}$ )

Жорсткістю газового мастильного шару називається зміна зусилля, що розкриває ущільнюючу пару, залежно від зміни висоти зазору (або несуча здатність, що припадає на одиницю товщини мастильного шару [Н/мкм]). Від її величини залежить здатність аксіально-рухомого кільця відстежувати осьові

коливання ротора, не допускаючи контакту робочих поверхонь.

Окрім форми зазору на жорсткість газової плівки також впливає форма канавок виконаних на сідлі. Так нереверсивні канавки хоч і є менш універсальними через те, що їхня працездатність забезпечується лише при певному напрямку обертання валу, але при цьому мають більшу жорсткість газової плівки.

Отже для забезпечення надійної роботи вузла ущільнення необхідна висока точність його виготовлення. З урахуванням того, що зазор між елементами ущільнювальної пари складає декілька мікрометрів (як правило, оптимальний режим роботи ущільнення здійснюється при зазорі приблизно 3 мкм), до робочих поверхонь ставляться підвищені вимоги шорсткості і площинності. Цими вимогами обґрунтовується і вибір матеріалів для виготовлення вузла ущільнення. Цим досягаються:

- стійка робота вузла ущільнення з оптимальним зазором при підвищеній температурі завдяки невеликим температурним деформаціям;
- зменшення ризику появи на робочій поверхні сідла подряпин при недостатній чистоті робочого газу.

## **1.2. *Форми газодинамічних канавок***

Фірми-виробники СГУ нарізають різний профіль газодинамічних канавок на робочій поверхні обертового кільця, що обертається. Залежно від режимів експлуатації, форма газодинамічної канавки може бути виконана в односпрямованому (нереверсивному) і двоспрямованому (реверсивному) виконаннях [1]. Глибина канавки може бути постійна або змінною. Найбільш часто використовувані форми канавок представлені на рис. 1.7.

З односпрямованих газодинамічних канавок, представлених на рис. 1.7 (а, б, в), найбільшого поширення у фірм-виробників СГУ набули канавки, представлені на рис. 1.7 (а), профіль яких утворено дугами кола. Дуги кола на передній і задній кромках канавки можуть мати відмінні одна від одної радіуси і кути нахилу до зовнішнього радіуса обертового кільця. Таку форму канавки

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

застосовують фірми "Грейс-інжинірінг", "JohnCrane".

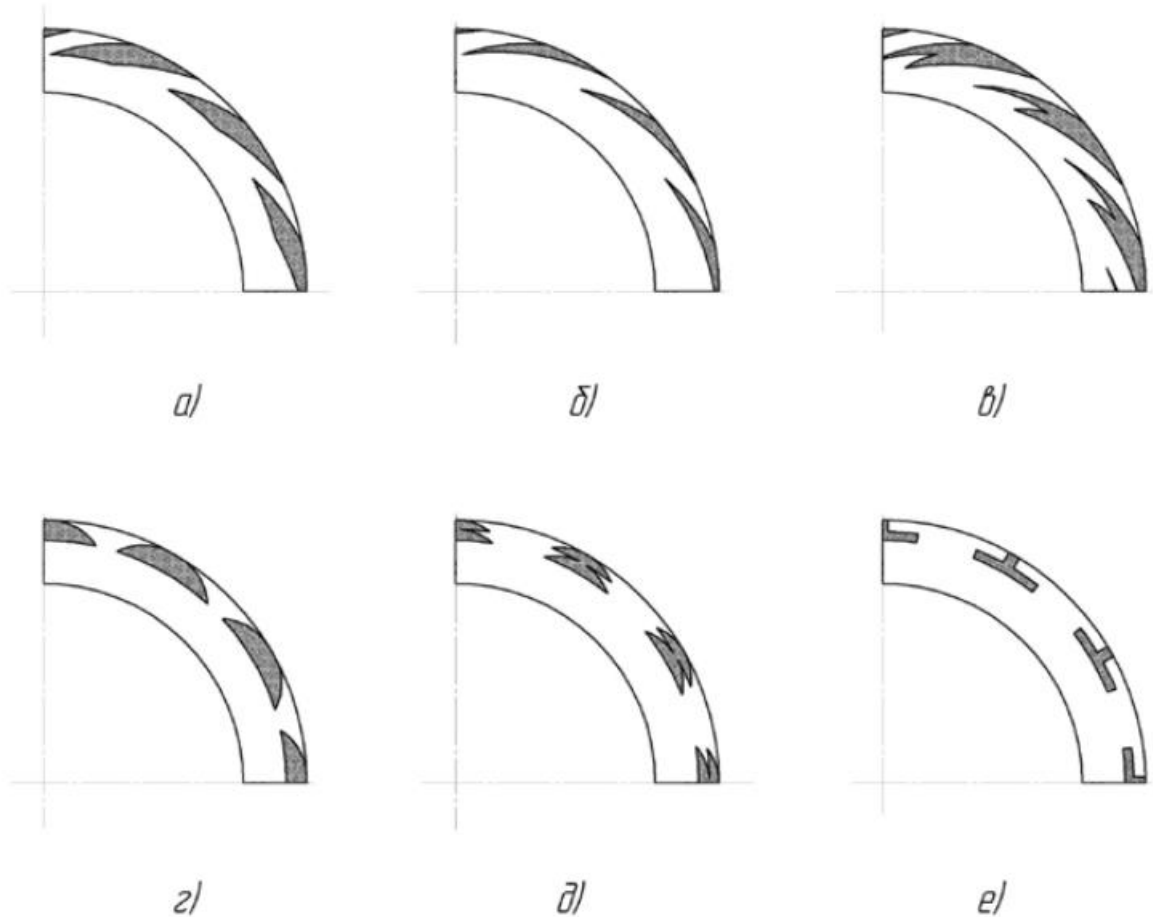


Рис. 1.7 – Форми газодинамічних канавок

а, б, в - форми односпрямованих (нереверсивних) газодинамічних канавок;

г, д, е - форми двонаправлених (реверсивних) газодинамічних канавок

На рис. 1.7 (б) представлено клиноподібну форму газодинамічної канавки газодинамічної канавки, яку застосовує фірма "EagleBurgmann". Утворення передньої і задньої кромки газодинамічної канавки перетинаються в точці, що дорівнює радіусу закінчення канавок, відповідно утворювальні мають відмінні радіуси і кути нахилу до зовнішнього радіуса обертового кільця. На думку виробника така форма канавки, в поєднанні зі змінною глибиною, забезпечує їх самоочищення. в разі засмічення за умови припинення подачі очищеного буферного газу [5].

Із двонаправлених газодинамічних канавок, представлених на рис. 1.7 (г, д, е), найбільшого поширення у фірм-виробників СГУ набули канавки,

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16



представлені на рис. 1.7 (г), профіль яких утворено дугами кола. Таку форму газодинамічної канавки використовують ЗАТ "НИИтурбокомпрессор ім. В.Б. Шнеппа", "EagleBurgmann", ТОВ НВФ "Грейс-інжиніринг". Форму канавки типу "ялинка" (рис. 1.7 д) застосовує фірма "JohnCrane", на рис. 1.7 (е) показано Т-подібний профіль канавки, який застосовувала фірма "Flowserve".

Для полегшення появи газового шару між кільцями газодинамічного ступеня під час пусків компресора за наявності високого тиску в корпусі стиснення, може бути виконано радіальний паз (рис. 1.8, а) або кільцева канавка (рис. 1.8, б), глибиною, що перевищує глибину газодинамічної канавки.

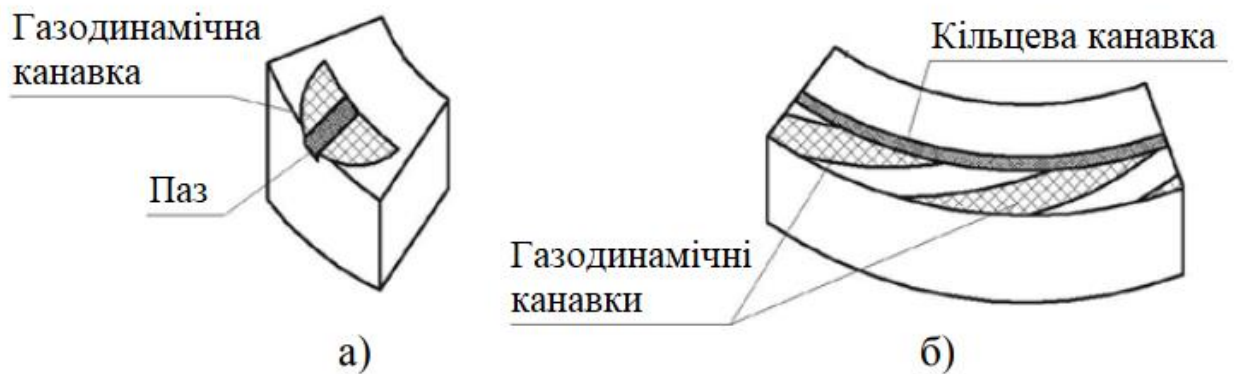


Рис. 1.8 Додаткове заглиблення (паз) у ділянці газодинамічної канавки

а - радіальний паз, виконаний на двонаправленій канавці;

б - кільцева канавка, виконана на односпрямованих канавках газодинамічних канавок

Визначити найкращу форму газодинамічної канавки з розглянутих типів важко. Величина аеродинамічної сили (реакції газового шару), створювана газодинамічними канавками під час обертання ротора, визначається не тільки формою, а й кутами нахилу її утворюючих до зовнішнього радіуса. Внесок у величину реакції газового шару, що визначається підвищенням тиску в зазорі між газодинамічними кільцями, залежить від розмірів канавок. Відомо, що на елементі "канавка" відбувається зростання тиску газової суміші що протікає по ущільнювальному зазору, а на елементі "виступ" падіння тиску. Тому

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

порівнювати між собою коректно тільки канавки однакової площі. Вищевикладене ускладнює аналіз впливу форми канавок на газодинамічні характеристики СГУ, всі представлені з яких, довели свою працездатність у процесі тривалої експлуатації в складі відцентрових компресорів.

### **1.3. Конструктивні схеми сухих газових ущільнень**

Сухе газове ущільнення умовно можна розділити на три частини:

- основна частина СГУ тримає тиск газу який знаходиться в проточній частині;

- роздільне (бар'єрне) ущільнення, розділяє основне ущільнення і камеру підшипника, тим самим захищає від потрапляння масла з підшипника в СГУ, а також від витоку ущільнюючого газу в камеру підшипника.

- ущільнення технологічної частини, розділяє основне ущільнення і проточну частину компресора. Таким чином створюється камера для подачі ущільнюючого газу з позитивним перепадом тиску в порівнянні з проточною частиною і цим виключає можливість попадання забрудненого газу з проточної частини компресора в СГУ. Часто функції цього лабіринту виконує лабіринт вирівнюючої лінії компресора, але бувають випадки, коли це ущільнення входить до складу СГУ.

#### **1.3.1. Основне ущільнення**

Для застосування в газових відцентрових компресорах найбільшого поширення набули чотири основні конструкції СГУ, які використовуються в залежності від умов експлуатації: одноступінчасте, двоступінчасте (тандемне), двоступінчасте з проміжним лабіринтом, подвійне ущільнення (спина до спини).

Одноступінчасті ущільнення (рис. 1.9) найчастіше застосовуються в компресорах стискаючих газу, витік яких у навколишнє середовище не становить небезпеки, наприклад, у процесах компримування повітря або азоту.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

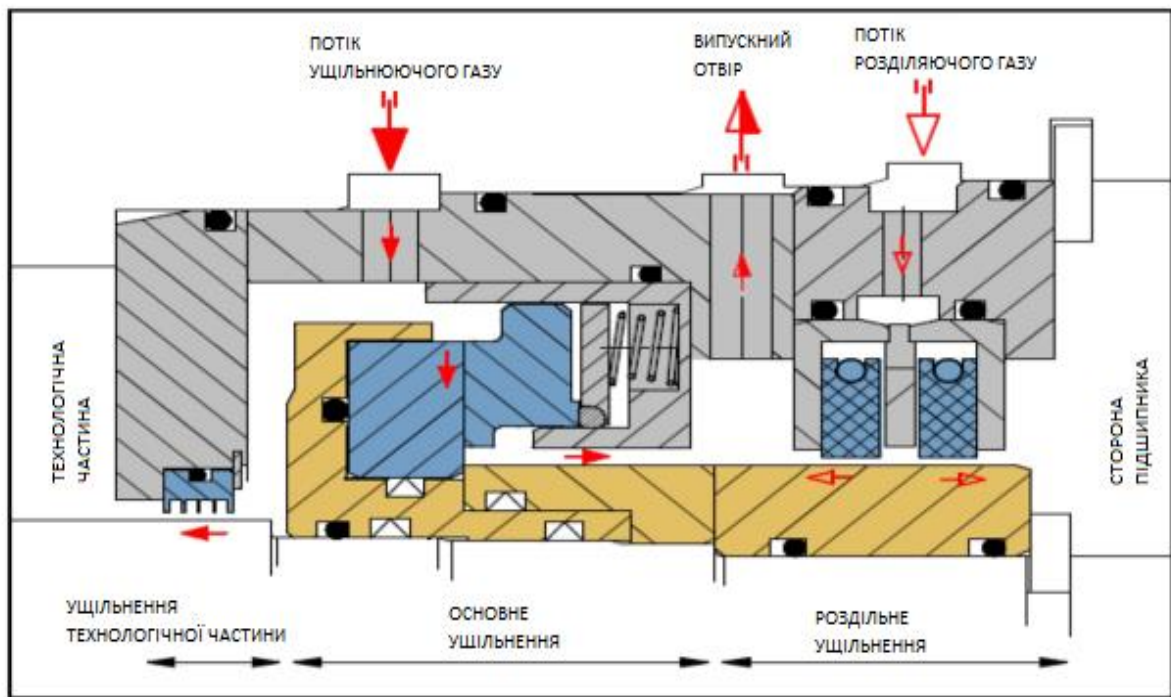


Рис. 1.9 - Схема одинарного ущільнення

СГУ такого типу можуть застосовуватися також, внаслідок конструктивних особливостей ВК. Наприклад, при заміні існуючої системи масляних ущільнень на систему СГУ, коли осьовий розмір посадкового місця під ущільнення не дозволяє розмістити СГУ іншої конструкції. Також одноступінчасті СГУ часто застосовуються на консольних машинах. При необхідності виключення витіку газу, що стискається, в довкілля одноступінчасті СГУ комплектуються з боку підшипника бар'єрним лабіринтним ущільненням, ущільненням з плаваючими кільцями, або маловитратним ущільненням. Це в поєднанні з підключенням до факельної лінії дозволяє виключити витік газу, що ущільнюється, в навколишнє середовище.

Основним недоліком одноступеневих СГУ є те, що при руйнуванні газодинамічного ступеня, наприклад через порушення технічного регламенту роботи компресора, газ, що ущільнюється, потрапляє в область підшипникових камер і далі в машинний зал.







ущільнення використовуються в середовищах зі зниженим тиском, коли витік технологічного газу в атмосферу неприпустимий. Ущільнюючий газ, тиск якого вищий за тиск технологічного газу, потрапляє в простір між двома ущільненнями. Витік газу через основне ущільнення, як і будь-який інший буферний газ, потрапляє в компресор/процес. Витік газу через допоміжне ущільнення зазвичай виводиться в атмосферу.

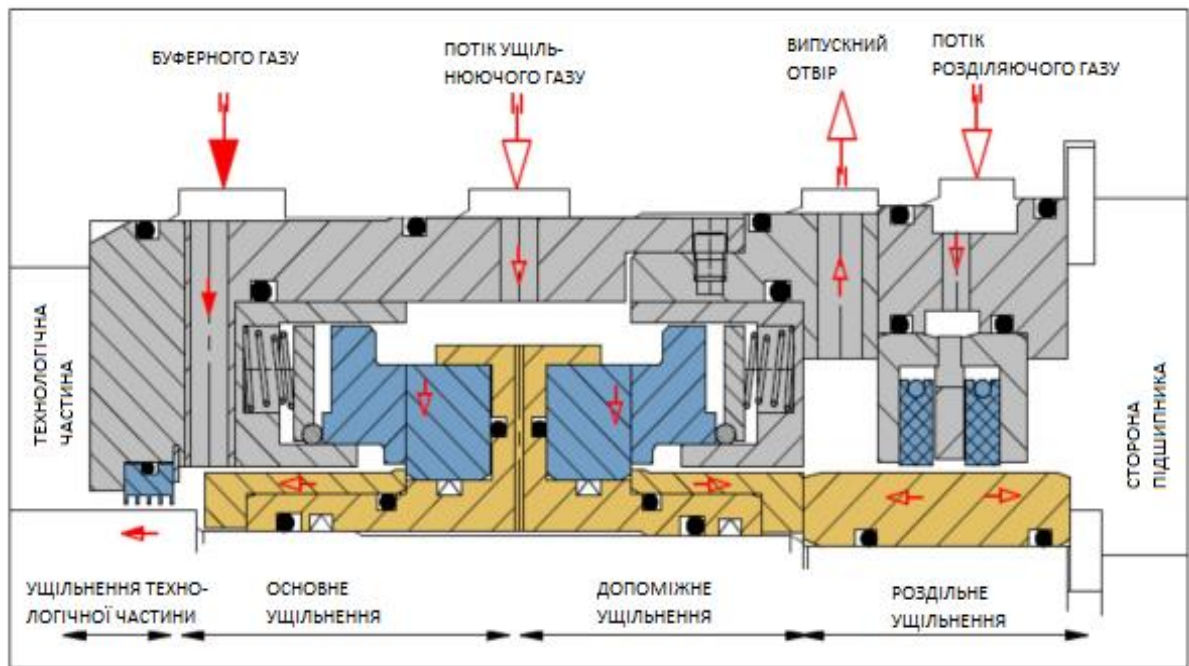


Рис. 1.12 - Схема подвійного ущільнення

### 1.3.2. Роздільне ущільнення

Роздільне ущільнення розташовується між сухим газовим ущільненням і камерою підшипника, і наповнюється розділяючим (бар'єрним) газом для того, щоб масло підшипника не потрапляло в порожнину ущільнення, а витік газу з ущільнення - камеру підшипника.

Найбільшого поширення отримали три форми роздільних ущільнень: лабіринтне ущільнення, з плаваючими кільцями (безконтактні) та маловитратні (контактні).

Лабіринтне ущільнення (рис. 1.13) має два набори зубів, розділених центральною камерою для забезпечення можливості введення бар'єрного газу.

Як правило, зубці розташовані стаціонарно, на фіксованій відстані (без контакту) від валу, що обертається. Бар'єрний газ надходить в центральну камеру з тиском, який вищий тиску за корпусом підшипника і тиску у вихідній камері ущільнення. Бар'єрний газ проходить через кільцевий простір, що створюється між зубами і поверхнею, що обертається.

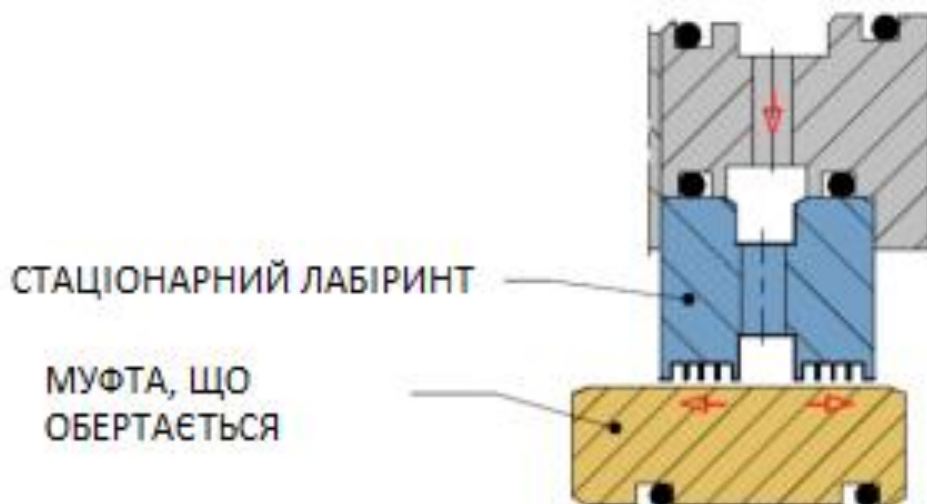


Рис. 1.13 – Схема лабиринтного роздільного ущільнення

Ущільнення з плаваючими кільцями (рис. 1.14) складаються з двох комплектів сегментованих кілець (як правило, виготовлених з вуглецевого матеріалу) та кільцевої пружини навколо зовнішнього діаметра, що скріплює сегменти між собою. Ці сегментовані кільця вільно розташовуються в корпусі та зафіксовані від провороту. Оскільки кільця є плаваючими, під час нормального функціонування системи внутрішній діаметр кільця знаходиться на мінімальній відстані від муфти, що обертається. Бар'єрний газ надходить в центральну камеру з тиском, який вищий за тиск за корпусом підшипника і тиску у вихідній порожнині ущільнення, а далі потрапляє в кільцевий простір, що створюється між сегментованими кільцями і поверхнею втулки.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

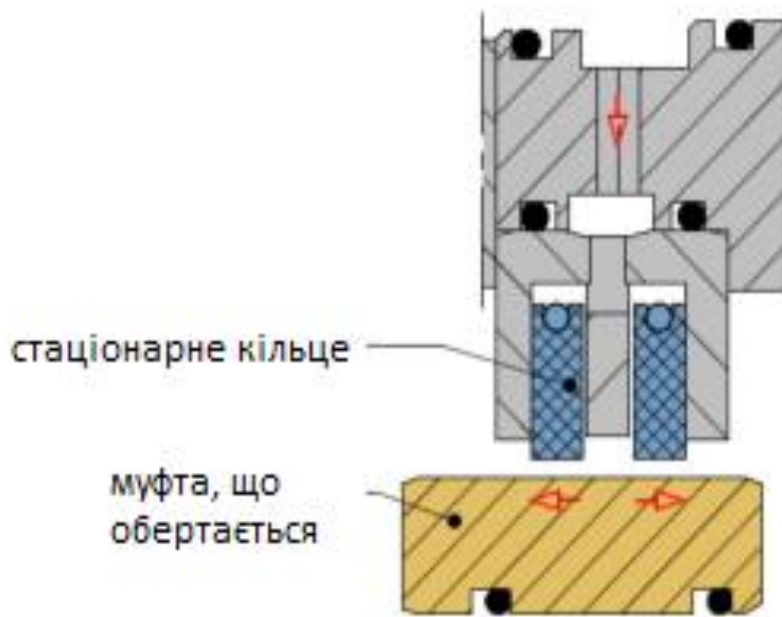


Рис. 1.14 – Схема бесконтактного ущільнення підшипника

Маловитратні ущільнення (рис. 1.15) складаються з двох комплектів сегментованих кілець із замковим з'єднанням (як правило, зроблених з вуглецевого матеріалу) та кільцевої пружини навколо зовнішнього діаметра, що скріплює сегменти між собою. На відміну від попереднього типу ущільнень, кільця в таких ущільненнях завжди контактують з втулкою забезпечуючи мінімальний зазор.

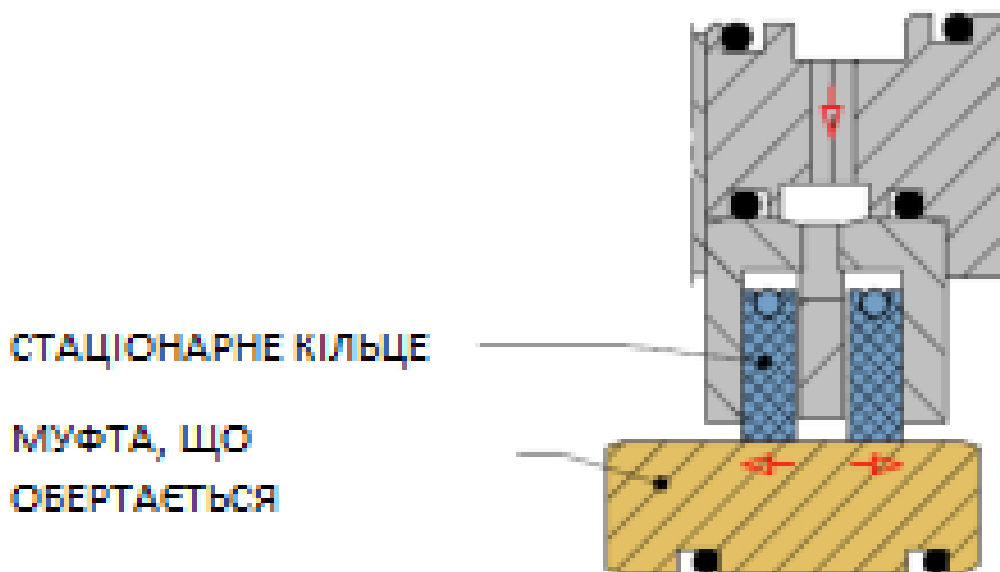


Рис. 1.15 – Схема контактного ущільнення підшипника

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24



### 1.3.3. Ущільнення технологічної частини

Ущільнення технологічної частини знаходиться між сухим газовим ущільненням і внутрішніми компонентами компресора. Коли в систему надходить буферний газ, ущільнення технологічної частини не допускає попадання технологічного газу в сухе газове ущільнення.

Найбільшого поширення отримали три форми ущільнень технологічної частини: лабіринтне ущільнення, ущільнення що стирається, з плаваючими кільцями (безконтактні).

Лабіринтне ущільнення складається з набору зубів, які можуть бути стаціонарними (нерухомими) або такими, що обертаються. Стаціонарні зуби лабіринту, як правило, зроблені з алюмінію або спеціального термопластика, а в конструкції між поверхнями, що обертаються, і зубами лабіринту спроектований зазор. Зубці лабіринту що обертаються, як правило, робляться з легованої сталі і встановлюються на невеликій відстані між зубами лабіринту і пластичним легкозамінним стаціонарним матеріалом. Щоб при нормальному функціонуванні стаціонарні і компоненти, що обертаються, не стикалися між собою, відстань між ними зазвичай перевищує зазор підшипника і обчислювані прогини валу. Приклад лабіринтного ущільнення технологічної частини наведено на рис. 1.16.

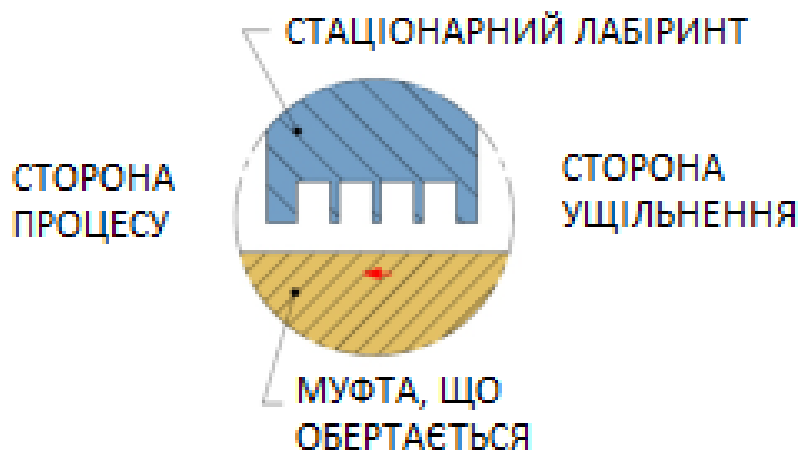


Рис. 1.16 – Схема лабіринтного роздільного ущільнення

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Ущільнення технологічної частини що стирається складається з лабіринту що обертається, набігає на стаціонарну поверхню, яка виготовлена з пластичного матеріалу. Зубці лабіринту, як правило, робляться з легованої сталі. Матеріал стаціонарної поверхні може бути політетрафторетиленом (PTFE) або будь-яким іншим, сумісним із процесом.

Дозволена відстань між стаціонарними та обертovими компонентами може бути меншою, ніж у звичайному лабіринті, але, як правило, вона повинна перевищувати зазор підшипника і обчислюваний прогин валу, щоб компоненти не стикалися між собою під час нормального функціонування. Пластичний матеріал необхідний для того, щоб у разі неполадок можна було уникнути серйозних пошкоджень компонента, що обертається, а зміна зазору не вплинула на швидкість потоку газу. Приклад ущільнення технологічної частини що стирається, показаний на рис. 1.17.

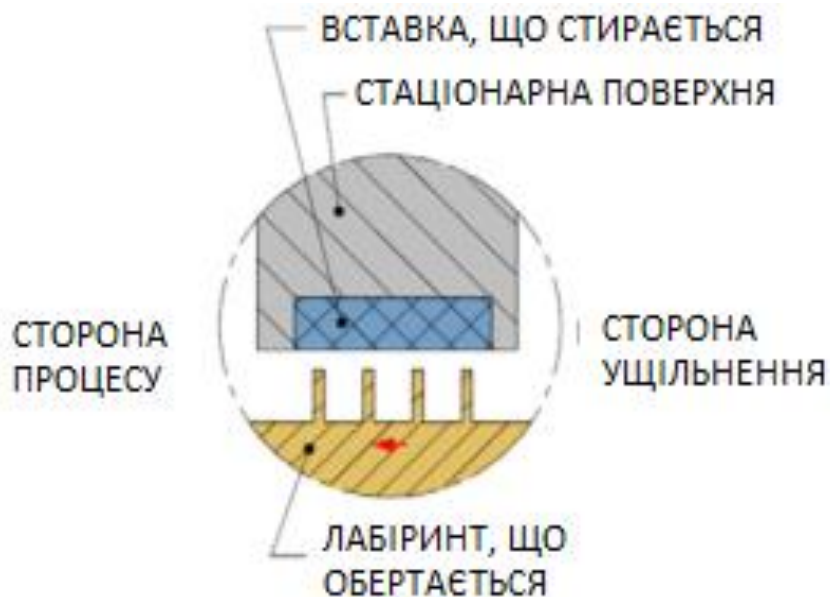


Рис. 1.17 – Схема технологічної частини ущільнення що стирається

Безконтактне ущільнення технологічної частини складається із одного або двох графітових кілець. Кільця переміщуються в радіальному напрямку усередині свого корпусу, що дозволяє скоротити зазор. Кільця і поверхня, що обертається, можуть мати різні теплові властивості розширення, у зв'язку з

чим зазор може змінюватися в залежності від холодного (статичного) і гарячого (динамічного) станів. Величина необхідної швидкості потоку газу через стаціонарні кільця вимірюється для холодного (статичного) стану. Це дозволяє досягти нижчого потоку ущільнюючого газу за нормальних умов роботи в порівнянні з лабіринтовими конструкціями з великими зазорами. Приклад безконтактного ущільнення технологічної частини показано на рис.1.18.

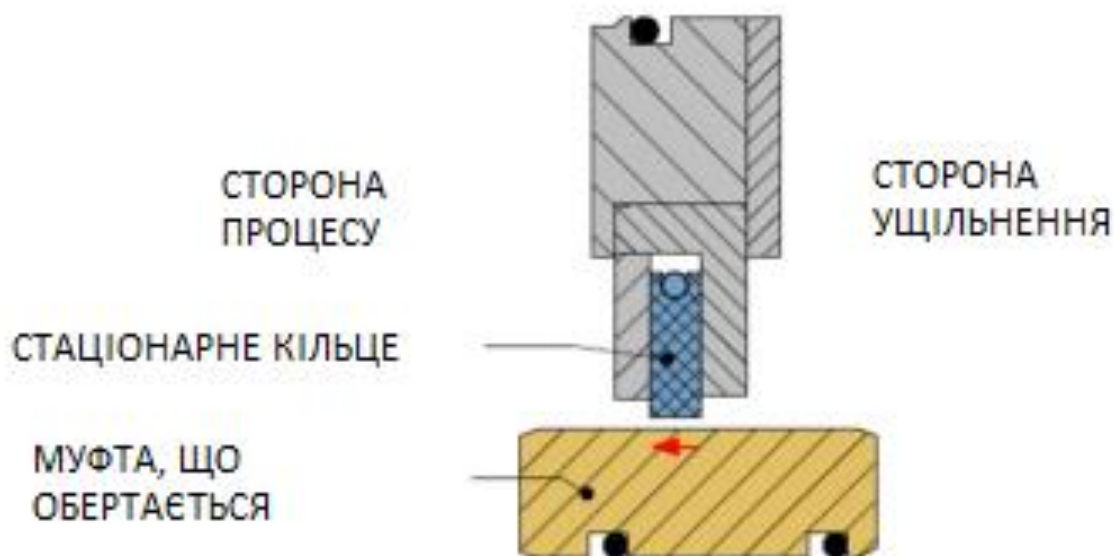


Рис. 1.18 – Схема безконтактного ущільнення

#### **1.4. Матеріальне виконання сухих газових ущільнень**

Не менш важливим є вибір матеріалу деталей ущільнення, а саме ущільнюючих кілець, корпусних деталей та вторинних ущільнень. Основні критерії які впливають на вибір матеріалу:

- хімічна сумісність (супротив матеріалів дії контактуючих газів);
- жаростійкість;
- міцність (супротив дії сили тиску, а також відцентрових сил);
- твердість та жорсткість (для ущільнюючої пари).

Найчастіше для виробництва сідла СГУ використовують карбід кремнію, нітрид кремнію, карбід вольфраму та сталь. Більшість використовуваних

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

матеріалів – це власні розробки, тобто організації створюють свої фірмові склади (матеріалів), а також методи (технології) їх виробництва. Якихось промислових стандартів, що регулюють властивості таких специфічних матеріалів, не існує. Тому кожен виробник ущільнень дотримується своїх власних внутрішніх стандартів і застосовує такі матеріали в рамках встановлених ним норм.

Матеріали (на основі) карбіду вольфраму (WC) мають високі опір, пружність та жорсткість. Як сполучні речовини найчастіше використовуються кобальт і нікель. У певних середовищах кожна з них піддається хімічному впливу. Нікелеві зв'язки покращують хімічну стійкість, але з ними матеріал стає трохи м'якшим, а опір його знижується. У порівнянні з іншими матеріалами ущільнення всі марки карбіду вольфраму мають більш високу щільність, що лімітується в свою чергу окружною швидкістю, яка складає не більше 130 м/с [7]. Якщо під час роботи відбувається пошкодження матеріалу, його фрагменти зазвичай завдають шкоди прилеглим конструкціям. Щоб цього уникнути, у конструкціях роторних втулок потрібно передбачити захисні бандажі, які візьмуть на себе дані фрагменти. Але в результаті закриття поверхонь ущільнення з карбіду вольфраму може виникнути наступна проблема - поверхні можуть стати ізольованими від газу, що обмежить їх адекватне охолодження. Це, залежно від теплових властивостей матеріалу поверхні ущільнення, сприяє тепловому руйнуванню матеріалу у вигляді термічного розтріскування, згідно з яким надмірна теплова напруга створює радіальні тріщини на ущільнюючій поверхні, які прогресують і можуть призвести до дрібнозернистих зламів. У деяких конфігураціях ущільнення маса роторної частини з сідлом із карбіду вольфраму велика, що ускладнює регулювання динамічної рівноваги. У більшості випадків, через свою високу твердість вона більш стійка до деформацій, ніж обертові поверхні ущільнення з інших матеріалів.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Є безліч марок карбіду кремнію (SiC), але в якості матеріалів для сідла ущільнення використовуються два основних типи - реакційно пов'язаний і отриманий спіканням. Для обох з них є свої варіанти гібридних композиційних матеріалів, в яких додані графіт (вільний вуглець) та інші матеріали для забезпечення покращених функціональних характеристик. Відповідно до способу виготовлення SiC існує безліч відмінностей у властивостях, обумовлених технологіями пресування, допоміжними засобами (речовинами), подрібненням зерна плюс додаткові пост-виробничі технічні прийоми відпалу, який проводиться для поліпшення міцності матеріалу. У композитних марках часто додається графіт, щоб поліпшити трибологічні властивості, однак, це поліпшення досягається на шкоду хімічній стійкості, твердості та опору. Типові пошкодження деталей із SiC - крихкий злам через постійний контакт при ущільнюючій взаємодії або поверхнях що труться у суміжних компонентів (вузлів). У більшості випадків це призводить до утворення дрібних фрагментів, що розосереджуються по всьому ущільненню. Як правило, до дроблення призводять низькі механічний опір (матеріалу) і в'язкість руйнування (тріщиностійкість), а воно, у свою чергу, може стати причиною порушень цілісності ущільнення.

Нітрид кремнію (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> або SiN) найчастіше використовується тоді, коли механічні властивості матеріалів SiC не здатні протистояти високим швидкостям обертання (зазвичай >180 м/с), при яких бажано мати підвищений опір розтягуванню і в'язкість руйнування. Однак, незважаючи на ці переваги, SiN не має такої ж хімічної стійкості, як матеріали SiC, що обмежує його застосовність. Стандартні механізми пошкоджень подібні до таких у SiC.

Іноді – коли слід уникнути наслідків крихкого зламу – застосовується легована сталь. Іноді ущільнювальна поверхня має ще й тверде покриття. Відповідно до низької твердості, властивої матеріалам з легової сталі, обмежується їх використання при низьких тисках (<50 бар), так як в цих умовах зазвичай виникають проблеми через зосереджену деформацію.

					KM 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Внаслідок того, що більшість матеріалів обертових поверхонь ущільнення виробляються з порошкових основ, важливо перевіряти структурну цілісність поверхонь ущільнення. Це здійснюється шляхом індивідуального випробовування при обертанні деталей на швидкостях, що значно перевищують намічені в стандартних робочих умовах. Для деталей ущільнення, виготовлених з легованої сталі з покриттям, таке випробування начебто не обов'язково, але після його успішного завершення можна бути повністю впевненим у відсутності порушення міцності зчеплення між покриттям і металевою основою. Часто зустрічаються пошкодження від швидкості обертання обумовлені напругою, оскільки випробування на підвищеній швидкості проводиться при 122% від MCS (максимальна тривала частота обертання), що створює навантаження, що перевищує на 50% стандартну для матеріалу.

Для виготовлення торця СГУ найчастіше використовують карбід кремнію та вуглеграфіт.

Матеріали з вуглеграфіту мають підвищені трибологічні характеристики та здатність протистояти невеликому уривчастому контакту. Гладкі вуглеграфітні матеріали пористі і проникні, внаслідок чого їм необхідне просочення, після якого буде забезпечена герметичність (газонепроникність). Більше того, процес просочення покращує характеристики опору матеріалів. Марки просоченого вуглеграфіту смолою мають хорошу хімічну стійкість, але слабкі механічно і мають властивість спучуватися. Марки з просоченням сурмою мають підвищену міцність та протидію спучування, але на шкоду хімічній стійкості. Також застосовуються марки вуглеграфітів з хромонікелевими просоченнями, які мають покращені властивості та хімічну стійкість, проте доступність обмежує застосування. Слід зазначити, що незалежно від сполучного компонента, вуглеграфіт не має таких характеристик механічної міцності, які мають інші матеріали поверхонь ущільнення, і це обмежує його використання навіть при помірних значеннях

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

тисків ущільнення (зазвичай 120 бар). Залежно від точки роси, контакт на малих швидкостях може викликати утворення невеликих грязеподібних частинок, які здатні заповнити конструкції канавок, погіршуючи тим самим їх роботу.

Через підвищену жорсткість карбіду кремнію він менш схильний до деформації, ніж матеріали з вуглеграфіту, і тому його можна використовувати в ущільненнях з високим тиском (більшим, ніж граничне для вуглецевих матеріалів). Він нездатний протистояти короткочасним невеликим контактам – тому потрібні трибологічні покриття, що захищають поверхню в ущільнюючій взаємодії при запуску/зупинці, а також у наступних умовах експлуатації: поворотно-обертальному русі (ретчетінг) і при працюючому редукторі поворотного пристрою.

В даний час технологія механічних поверхонь ущільнення передбачає як покриття використання штучні алмази. Товщина таких покриттів зазвичай становить від 1 мкм (мікрон) до 5 мкм. Технологія передбачає використання покриттів із двох груп: алмазоподібний вуглець (DLC) та полікристалічний алмаз (PCD). Покриття DLC мають пов'язану структуру  $sp^2/sp^3$  на основі змішаної гексагональної кристалічної решітки, схожої на таку у графіту, що надає йому хороші фрикційні властивості, а також показники твердості, схожі з матеріалами SiC (від 2,000 HV до 3,000 HV). (HV – позначення твердості за Віккерсом.) Покриття з PCD мають аморфну кристалічну структуру, подібну до алмазної, і демонструють екстремальну твердість (10,000 HV). Штучні алмазні покриття часто застосовуються в сухих газових ущільненнях, де виникає сполучення армованих поверхонь – завдяки їм мінімізуються руйнівні дії від невеликих контактів під час запуску, зупинки, поворотно-обертального руху та при працюючому редукторі поворотного пристрою.

Так як ущільнююча пара складається з сідла і торця, які взаємодіють між собою, в залежності від умов їх роботи є певні критерії по вибору матеріалу з

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

якого вони будуть виконані. В таблиці 1.1 приведені найпоширеніші комбінації.

Табл. 1.1 – Комбінації ущільнюючих пар

Комбінація поверхонь	Торець	Застосування	Сідло	Застосування
C-WC	Вуглеграфіт	Вуглеграфіт під тиском схильний до деформації, що обмежує застосування з високим тиском	Карбід вольфраму	Карбід вольфраму підходить для швидкостей < 130 м/с
C-SiC			Карбід кремнію	Карбід кремнію підходить для швидкостей < 140 м/с
C-SiN			Нітрид кремнію	Нітрид кремнію підходить для швидкостей > 140 м/с
C-SS			Легована сталь з покриттям	Деформація від тиску та тепла обмежують застосування, як правило значенням < 80 бар абсолютного тиску
SiC-WC	Карбід кремнію*	Карбід кремнію під тиском має дуже малі деформації, тому його можна використовувати в умовах екстремальних тисків	Карбід вольфраму	Карбід вольфраму підходить для швидкостей < 130 м/с
SiC-SiC			Карбід кремнію	Карбід кремнію підходить для швидкостей < 140 м/с
SiC-SiN			Нітрид кремнію	Нітрид кремнію підходить для швидкостей > 140 м/с
* Для ущільнюючої взаємодії в поверхнях часто застосовується покриття з DLC, щоб покращити трибологічні властивості (зносостійкість при контакті).				

C – вуглецевий матеріал; SiC – карбід кремнію; SiN – нітрид кремнію; SS – нержавіюча сталь; WC – карбід вольфраму; DLC – алмазоподібний вуглець.



Основний критерій вибору матеріалів для роторних та корпусних деталей ущільнення базується на термостійкості, опорі та на хімічній сумісності. Відповідно до цього, досить часто використовується нержавіюча сталь - вона широко представлена на ринку і безліч її властивостей дозволяють її застосовувати для роботи в агресивному середовищі. Аустенітні марки мають хорошу хімічну стійкість, але низький механічний опір – тому їх використання при високому тиску та помірних швидкостях обмежене. Мартенситні матеріали мають ширше використання, оскільки характеристики їхнього опору дуже високі, однак, якщо передбачається робота за низької температури, то дана група матеріалів навряд чи підійде. Іноді виробники пропонують інші марки сталі (табл. 1.2) – спеціалізовані, які не відповідають загальноприйнятим стандартам. У їхньому складі зазвичай багато нікелевих сплавів.

Табл. 1.2 – Типи матеріалів для деталей СГУ

Опис матеріалу	Найменування марки	ASTM	UNS	Використання
Аустенітна нержавіюча сталь	316(L)	A479 Тип 316L	S31603	Малопотужні ущільнення, що потребують хімічної стійкості
Мартенситна нержавіюча сталь	410	A479 Тип 410	S41000	Ущільнення середньої потужності, що потребують помірної хімічної стійкості
Мартенситна нержавіюча сталь	418	A479 Тип 418	S41800	Ущільнення середньої потужності, що вимагають помірної хімічної стійкості та можливості експлуатації при низьких температурах

Продовження табл. 1.2

Опис матеріалу	Найменування марки	ASTM	UNS	Використання
Мартенситна нержавіюча сталь	Дуплексна	A276-S31803	S31803	Ущільнення середньої потужності, що вимагають опір піттингової корозії та хімічну стійкість
Мартенситна нержавіюча сталь	Супер-дуплексна	A276-S32760	S32750	Високопотужні ущільнення, що вимагають опір піттингової корозії та хімічну стійкість
Мартенситна нержавіюча сталь	17-4 PH	A564	S17400	Високопотужні ущільнення, що вимагають помірної хімічної стійкості
Нікель, хром, молибден	Сплав C276	B574	N10276	Ущільнення середньої потужності, що потребують надзвичайної хімічної стійкості
Сплав нікель-залізо-хром	Сплав 20	B473	N08020	Ущільнення середньої потужності, що потребують певної хімічної стійкості
Сплав нікель, мідь	Сплав 400	B164	N04400	Ущільнення середньої потужності, що потребують певної хімічної стійкості
Сплав PH нікель, мідь	Сплав 500	B865	N05500	Високопотужні ущільнення, що потребують певної хімічної стійкості
Хромнікелевий сплав	Сплав 625	B446	N06625	Ущільнення середньої потужності, що виконуються за підвищеної температури

Для покращення властивостей матеріалів або функціонування в критичних областях вибрані металеві поверхні можна просочувати або покривати. Для запобігання зносу можуть знадобитися тврдосплавні наплавлення або покриття.

Якщо в якості газу застосовується сірководень, то найчастіше виготовлені зі сталі компоненти будуть піддаватися різним формам хімічного впливу та піттингової корозії (роз'їдання), головним чином розтріскування. Для таких умов зазвичай підбирається сталь зі стабілізованою зернистою структурою, а для мінімізації потенційного розтріскування жорстко контролюється твердість. Такі матеріали мають покриття, що відповідає міжнародному стандарту NACE MR0103. У тих випадках, коли визначаються саме ці матеріали, потрібно додавати до ущільнень належну документацію як свідчення відповідності.

Нерухомі ущільнювальні елементи (вторинні ущільнення), що використовуються в складальних вузлах сухого газового ущільнення, бувають двох основних типів: еластомірні самозбудливі ущільнення та полімерні ущільнення піджаті пружиною (манжети). Ці вторинні ущільнення використовуються для запобігання витоку між суміжними деталями ущільнення і елементами компресора.

Ущільнюючі кільця (O-rings) – це еластомірні самозбудливі ущільнення, які стиснуті всередині канавок для «впливу» на початкову ущільнюючу взаємодію, на яку надалі впливатиме тиск і температура ущільнюваного (герметизованого) середовища плюс будь-яке обертання (рух).

Граничні значення тиску для ущільнюючих кілець залежать від матеріалу, температури та геометрії (зокрема від коефіцієнта заповнення канавки та екструзійного зазору).

Швидке падіння тиску газу (вибухова декомпресія) – це певний випадок, де не слід використовувати еластомери. Мікроструктура матеріалу дозволяє газам з високим тиском поширюватися в матеріал кільця ущільнювача,

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

формуючи тим самим кишені з газом високого тиску які затримуються всередині матеріалу. Коли тиск у системі падає, ці кишені залишаються з високими значеннями тиску, і ущільнюючі кільця можуть бути пошкоджені через розтягуючі зусилля, які утворюються внаслідок розширення газу від різниці тисків між кишнями і зниженим тиском в системі. Цей процес підпорядкований швидкості падіння тиску, зазвичай задається швидкість 20 бар/хв (положення M710 у стандарті NORSOK), щоб захистити ущільнювальні елементи від пошкодження, хоча ця швидкість може бути й іншою з урахуванням змін температури. Інші засоби захисту ущільнювальних кілець від пошкодження RGD/ED (швидке падіння тиску газу / вибухова декомпресія) – використання таких марок (матеріалів кілець), які краще протистоять цим ефектам. Це – клас стійких до RGD/ED матеріалів, які проходять спеціальні випробування, що оцінюють цілісність за умов швидкого падіння тиску. Вони в більшості випадків мають більш високі твердість (90 Шор А), щільність і опір, ніж стандартні матеріали ущільнювальних кілець. Враховуючи також, що твердість (та інші властивості) значно змінюються залежно від температури, еластомери потрібно застосовувати з обережністю за низьких температур – підвищується їхня твердість.

Еластомірні матеріали схильні до ефектів старіння – початкові властивості зменшуються з часом, від температури, освітлення і стисненості. Сумарний ресурс кільця ущільнювача зазвичай не перевищує 15 років, він складається з терміну зберігання (коли ущільнювальне кільце знаходиться на зберіганні перед використанням), часу використання на устаткуванні (починаючи з моменту його встановлення в канавку або в порожнину) і періоду обслуговування (коли воно піддається впливу ущільнюючого середовища). Так як на ресурс кільця ущільнювачів найбільший вплив надає інтенсивність (суворість) умов обслуговування, то саме цей фактор є визначальним при оцінці очікуваного сумарного ресурсу. Враховуючи це потрібно дотримуватися необхідних умов зберігання – кільця ущільнювачів

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

повинні знаходитися в герметичних непрозорих упаковках, що захищають від світлового впливу, поруч не повинно бути джерел тепла.

У тих ситуаціях, коли є хімічна несумісність, екстремальні стрибки температури, високі значення тисків ущільнення, а також виникають складності у зв'язку зі швидким падінням тиску - можуть бути використані полімерні ущільнення з піджатими пружинами, як альтернатива еластомерним ущільнювачам. Загалом і в цілому – вони сконструйовані таким чином, щоб заповнити стандартні для ущільнювальних кілець канавки.

Конструкція цих ущільнень складається з полімерної (несучої) оболонки та сталеві пружини. На відміну від пристроїв (виробів) у вигляді самозбудливих кілець ущільнювачів, тут потрібна пружина для силового впливу на край ущільнення, щоб скомпенсувати додаткові твердість і в'язкість матеріалу оболонки. Найчастіше матеріал оболонки – PTFE (фторопласт, політетрафторетилен, тефлон), який може містити допоміжні наповнювачі, такі як скло, графіт з метою покращення протистояння тиску, фрикційних характеристик та зносостійкості. Для запобігання видавлюванню при підвищеному тиску використовуються резервуючі пристрої з РЕЕК (полієфірэфіркетону) або металу.

Вибір матеріалу для вторинного ущільнюючого елемента зазвичай ґрунтується на його хімічній стійкості, обмеження по тиску та температурі, однак, у будь-якому випадку, відповідний матеріал повинен витримувати очікувані швидкості падіння тиску для заданої температури.

### ***1.5. Конструкція та призначення контрольно-вимірювальної панелі***

Контрольно-вимірювальна панель (КВП СГУ) (рис. 1.18), як складова частина системи сухих газових ущільнень, забезпечує надійну та довготривалу роботу вузлів ущільнень. Основне завдання КВП СГУ – контроль та

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

забезпечення умов експлуатації СГУ, а також видача сигналу блокування або аварійного сигналу у разі виникнення несправностей.

Конструкція та принцип дії КВП СГУ набагато простіше та надійніше в порівнянні з системою ущільнювального масла. До складу системи входить блок фільтрів, запірно-регулююча арматура та необхідний набір контрольно-вимірювальних приладів.

КВП СГУ виконує такі основні функції:

- тонка фільтрація буферного газу, який подається в ущільнення;
- контроль витрати та тиску очищеного буферного газу, який подається в СГУ;
- контроль величини витоку з ущільнення;
- контроль тиску в лінії витоку за першим ущільнювальним ступенем, та видача сигналу у разі його зростання;
- очищення бар'єрного газу, який подається в ущільнення;
- контроль та регулювання тиску бар'єрного газу на подачі в ущільнення.

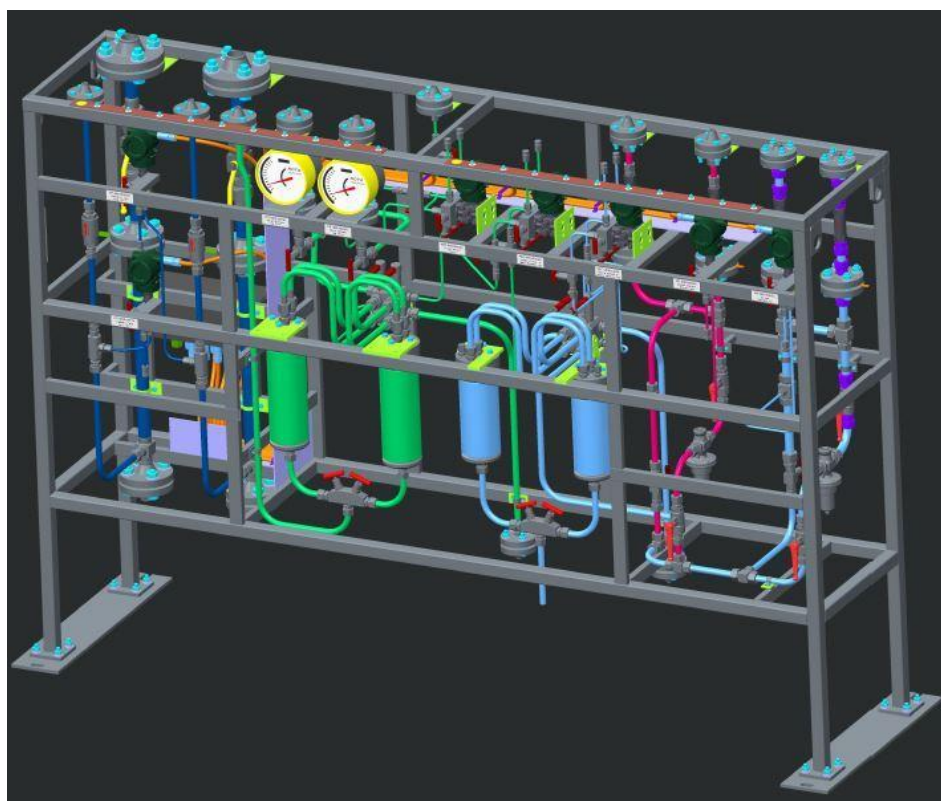


Рис. 1.18 – Контрольно-вимірювальна панель

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Представлений перелік функцій може змінюватися в кожному індивідуальному випадку, враховуючи умови роботи системи СГУ, компоновальні схеми СГУ, а також вимог і можливостей замовника.

Наприклад встановлення додаткових ліній аварійного скидання тиску з області первинного витоку, забезпечених мембранами прориву, дозволяє у разі втрати герметичності першого ступеня ущільнення знизити тиск перед другим ступенем. Як наслідок, зменшується величина аварійного витоку через другий ступінь, що дозволяє суттєво знизити витрату бар'єрного повітря, що подається в ущільнення.

Конструкція КВП СГУ забезпечує простоту обслуговування, контролю та керування робочих параметрів. Усі місцеві прилади встановлюються на лицьовій стороні КВП СГУ. Компонування приладів забезпечує одночасний зручний контроль усіх параметрів, що виводяться. Запірно-регулююча арматура розташована так, щоб забезпечувати зручність її монтажу-демонтажу та регулювання.



Рис. 1.19 – Контрольно-вимірювальні прилади

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

Надійність КВП СГУ забезпечується використанням приладів (рис. 1.19) та арматури провідних світових виробників, які позитивно зарекомендували себе в експлуатації на різних об'єктах виробництва. При встановленні системи СГУ у пожежо- чи вибухонебезпечних зонах КВП СГУ комплектується приладами з відповідним класом вибухозахисту. З урахуванням даних вимог проводиться прокладання необхідних електричних мереж, як силових, так і вторинних ланцюгів.

### **1.6. Мета роботи**

Враховуючи актуальність використання систем сухих газових ущільнень метою даної кваліфікаційної роботи буде створення проекту такої системи для відцентрового компресора природного газу потужністю 16 МВт, кінцевим тиском  $P_k=7,45$  МПа та відношенням тисків  $\pi_k=1,35$ .

Так як зазвичай відцентрові компресори для газової промисловості виготовляються з максимальним діаметром валу під встановлення СГУ 180 мм, особливістю цього проекту буде розробка сухого газового ущільнення для використання в складі компресора з більшим діаметром валу під встановлення СГУ, а саме 200 мм.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



## 2. Розрахунково-конструкторська частина

Сухі газові ущільнення виготовляються з дуже високою точністю, мають складну конструкцію, а також вимагають тонкої очистки газу, що проходить через торцевий зазор. Тому створення працездатного ущільнення можливе лише при правильному розумінні фізичних процесів, що відбуваються в торцевому зазорі, виборі методик розрахунку основних характеристик, матеріалів пар тертя, конструюванні, високій технології виготовлення та ретельній установці в компресор. При цьому особливого значення набуває експериментальна доводка таких ущільнень.

При проектуванні сухих газових ущільнень необхідно дотримуватись вимог ряду стандартів і нормативних документів. Стандарт API 692 є одним з таких стандартів, розроблений Американським інститутом нафти та газу (API) [7].

Перед початком проектування потрібно узгодити всі експлуатаційні показники майбутнього виробу. Для цього виконавець розробляє технічне завдання (ТЗ) яке повинно бути погоджене замовником. ТЗ розробляється на основі даних експлуатації які надає замовник. Для проектування СГУ основні дані це:

- властивості газу (склад, забруднення, вміст вологи);
- тиск (тиск в динаміці, статичний тиск, тиск на інших режимах роботи, якщо такі є);
- температура в області установки СГУ;
- частота обертання ротора (робоча частота обертання, максимальна частота обертання, наявність валоповороту);
- габарити місця установки ущільнення в компресор (діаметр валу, посадкові діаметри кришки компресора та інші розміри).

Проектування СГУ відбувається на етапі створення ТЗ і після його узгодження з замовником ми маємо готовий проект, на базі якого починається

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

розробка конструкторської документації, технологічної документації, закупка необхідних матеріалів та інше.

Якщо замовником не було вказано конструктивну схему газового ущільнення, то в залежності від умов експлуатації необхідно вибрати найбільш оптимальний варіант типу газового ущільнення.

Роторні та корпусні деталі необхідно проектувати максимально простими з точки зору технології виробництва, але щоб при цьому вони виконували свої функції без шкоди для якості.

Вторинні ущільнення підбираються в залежності від умов експлуатації, а саме робочого середовища, тиску та температури. Це можуть бути еластомерні ущільнюючі кільця (O-rings), еластомерні кільця в PTFE оболонці, а також полімерні ущільнення (манжети).

Окрім того, при проектуванні ущільнення необхідно приділяти увагу не тільки функціональній складовій, а й робити його максимально простим в плані обслуговування та експлуатації. Ущільнення повинно розбиратися та складатися з мінімальним використанням інструменту, а тим більше спеціального. Це ж саме стосується і монтажу СГУ, всі технологічні кріплення повинні бути передбаченими ще на етапі проектування. Все це може зіграти важливу роль при проведенні монтажних та пуско-налагоджувальних робіт.

## 2.1. Вибір конструкції та матеріалів вузлів СГУ

В якості вихідних даних використаємо наступні дані (таблиця 2.1)

Таблиця 2.1 – Експлуатаційні показники роботи СГУ

1. Робоче середовище компресора (склад - % мольні)	природний газ (CH <sub>4</sub> - 96,74%; N <sub>2</sub> - 0,75%; CO <sub>2</sub> - 0,086%; C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> - 1,66%; C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> - 0,53%; C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + вищ. - решта)
2. Тиск робочого середовища в області ущільнень, МПа(абс) - у динамічному режимі - у статичному режимі	5,17...5,73 7,45
3. Частота обертання ротора, об/хв	3710...5565

Продовження таблиці 2.1

4. Допустиме значення подвійної амплітуди вібрацій, мкм	200
5. Буферний газ для подачі у вузли СГУ	природний газ
6. Тиск буферного газу на подачі в КВП СГУ, МПа(абс)	7,45
7. Температура буферного газу на подачі в КВП СГУ, °С	від плюс 20 до плюс 80
8. Необхідна витрата буферного газу для подачі в кожен вузол СГУ, норм. м <sup>3</sup> /год	300...350
9. Витік буферного газу через кожен вузол СГУ, норм.л/хв.	не більше 150
10. Бар'єрний газ для продування кінцевих лабіринтів	повітря
11. Тиск бар'єрного повітря на подачі в КВП СГУ, кПа	40...60
12. Температура бар'єрного повітря на подачі в КВП СГУ, °С	від плюс 5 до плюс 60
13. Необхідна витрата бар'єрного газу для подачі в кожен вузол СГУ, норм. м <sup>3</sup> /год	60
14. Гранично допустимий осьовий хід роторної частини ущільнення відносно статорної, мм	плюс/мінус 3,0

Враховуючи параметри та умови експлуатації, найбільш оптимальним варіантом ущільнення буде тандемне ущільнення з односпрямованими спіральними канавками, в якості роздільного ущільнення застосуємо подвійне лабіринтне ущільнення. Так як колові швидкості та тиск не значні, в якості матеріалу для сидла можна використати карбід вольфраму, а торець виготовити з графіту з просоченням. Так як відсутні додаткові вимоги стосовно хімічної стійкості, міцності та жаростійкості для виготовлення деталей ущільнення буде використана сталь 20Х13 ГОСТ 5632-2014. В якості вторинних ущільнень слід використовувати еластомерні ущільнюючі кільця (O-rings) з фторкаучуку ТУ 380051166-98.

Наступний етап, який у конструкторській практиці носить назву - "промрисовки". Метою промрисовки є визначення форми та розмірів деталей ущільнення, а насамперед попередніх розмірів газодинамічних кілець.

Для визначення внутрішнього радіуса обертового кільця R<sub>3</sub> промальовується втулка поз. 11 [1]. Втулка служить для передачі крутного

моменту від ротора компресора до обертового кільця поз. кільця поз. 13 першого ступеня ущільнення, а також фіксації його уламків у разі руйнування під час аварійних ситуацій. Радіус втулки поз. 11 у місці сполучення з внутрішнім радіусом обертового кільця обертового кільця  $R_3$  (рис. 2.1) визначається виходячи з габаритних розмірів ущільнення. З урахуванням діаметра вала 200 мм, приймаємо  $R_3=111$  мм.

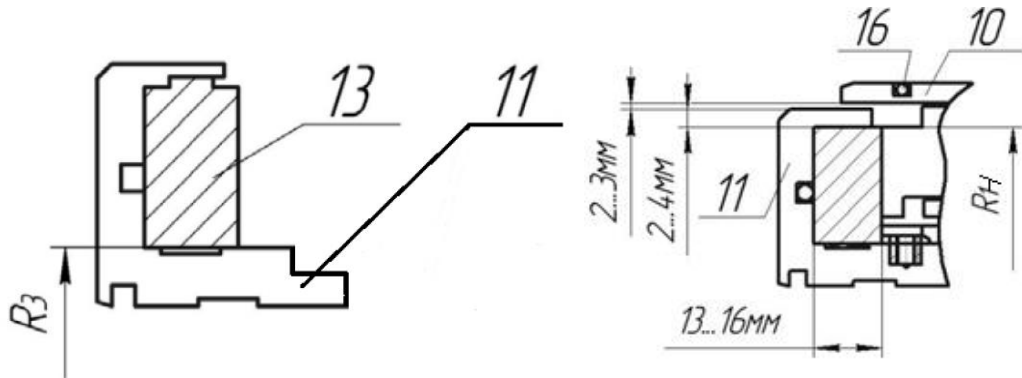


Рис. 2.1 – Визначення розмірів сідла

Для визначення зовнішнього радіуса обертового кільця промальовується корпус поз. 10 у місці встановлення гумового кільця ущільнювача поз. 16. Розміри канавки під кільце поз. 16 і діаметр кільця визначаються із загальноконструкторських рекомендацій і ГОСТів. Далі вибирається радіальний зазор між зовнішнім радіусом втулки поз. 11 и корпусом поз. 10 разом їхнього сполучення. Зазор має становити 2...3 мм, з метою унеможливлення контакту роторних і статорних частин ущільнення під час нерозрахункових режимів, наприклад помпажу компресора. Зовнішній радіус обертового кільця визначається виходячи з відомого зовнішнього радіуса втулки поз. 11, з урахуванням того що товщина втулки в місці сполучення становить 2...4 мм. Товщина обертового кільця поз. 13 вибирається в діапазоні 13...16 мм. Приймаємо зовнішній радіус  $R_H=140,25$  мм, а товщину кільця  $S=15$  мм.

Визначаємо розміри аксіально-рухомого кільця (торця) поз. 1 рис. 2.2.

									Арк.
									44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КМ 14.00.00.00 ПЗ				



Товщина аксіально-рухомого кільця  $L_k$  вибирається в діапазоні 12...16 мм.  
Приймаємо  $L_k=16$  мм.

Розмір  $l_1$  вибирається попередньо як  $1/2$  від товщини кільця  $L_k$ .

Розмір  $l_2$  вибирається попередньо як  $1/3$  від товщини кільця  $L_k$ .

Із промальовування визначається радіус  $R_{вис}$ , який повинен бути більшим за  $R_3$  на 5... 7 мм.

## **2.2. Функціональні та конструктивні вимоги до КВП СГУ**

**КВП СГУ повинна забезпечувати виконання таких функцій:**

- 1) Очищення і відділення крапельної вологи з буферного газу, що подається в ущільнення (тонкість очищення - 1 мкм);
- 2) контроль забрудненості фільтроелемента, передавання на ЦПУ сигналу 4...20 мА про величину перепаду тиску на фільтрі;
- 3) регулювання і контроль перепаду тиску між тиском буферного газу, що подається в ущільнення, і тиском технологічного газу, що транспортується, в ділянці ущільнень (перепад тиску "газ-газ"), передача на ЦПУ сигналу (4...20 мА) про величину перепаду тиску "газ-газ";
- 4) контроль тиску бар'єрного повітря, передавання на ЦПУ сигналу 4...20 мА про величину тиску бар'єрного повітря перед дроселем;
- 5) візуальний контроль величини витoku першого ступеня ущільнення;
- 6) контроль тиску за першим ступенем ущільнення, передавання на ЦПУ сигналу 4...20 мА про величину тиску;
- 7) сигналізація на ЦПУ про розрив мембрани (сухий контакт).

### **Вимоги до конструктивного виконання:**

- 1) Усі прилади з місцевими показаннями повинні встановлюватися на лицьовій стороні КВП СГУ. Компонування приладів має забезпечувати зручний одночасний контроль усіх виведених параметрів. Розташування запірно-регулювальної арматури і приладів КВП і А повинно забезпечувати зручність регулювання, монтажу і демонтажу.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

2) Місце для встановлення КВП СГУ має обиратися виходячи з умови зручності виконання складальних, монтажних і ремонтних робіт, зручності контролю роботи системи СГУ, а також забезпечення вимог щодо сумарних втрат тиску в трубопроводах.

3) КВП СГУ має бути укомплектована відповідними фланцями та штуцерами із зазначенням DN, PN і марки матеріалу.

**Технічні вимоги до трубної обв'язки КВП СГУ:**

1) Для всіх ліній подавання і відведення газових потоків "джерело тиску - КВП СГУ - ущільнення - КВП СГУ" повинна застосовуватися труба, виконана з нержавіючої сталі.

2) Перерізи каналів відведення первинного і вторинного витоків повинні бути не менше Ду50. На лініях первинного витoku мають бути встановлені розривні мембрани, калібровані на тиск 4,0 кгс/см<sup>2</sup>. Відбір первинного витoku для контролю в КВП СГУ повинен здійснюватися під мембранним запобіжним пристроєм).

3) Сумарні втрати тиску (в каналах компресора і трубопроводах подачі) в лінії подачі розділового повітря від КВП СГУ до кожного ущільнення не повинні перевищувати 0,1 кг/см<sup>2</sup>.

4) Сумарні втрати тиску (в каналах компресора і трубопроводах скидання) в лінії скидання вторинного витoku від кожного ущільнення не повинні перевищувати 0,1 кг/см<sup>2</sup>. Скидання вторинних витоків має здійснюватися через трубопроводи вгору безпосередньо від компресора (минаючи КВП СГУ).

5) Трубопроводи, що з'єднуються з нижніми фланцями КВП СГУ і розміщені над підлогою, мають бути закриті металевими містками.

6) Відбір імпульсу на РПД повинен здійснюватися безпосередньо із задумісної порожнини окремим каналом.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

### **Вимоги до системи електричної обв'язки КВП СГУ:**

1) Електричні кола КВП СГУ та обв'язки, призначені для живлення приладів, а також для передавання попереджувальної сигналізації та сигналів аварійної зупинки агрегату, мають бути виготовлені відповідно до ПУЕ (розділ 7.3) і ГОСТ Р 51330.13.

2) Приєднання зовнішніх електричних кіл до приладів КВП СГУ повинно здійснюватися через вибухозахищену клемну коробку з сальниковими вводами. Клемні коробки для під'єднання зовнішніх кабелів входять до комплекту постачання СГУ. Електричні кола від приладів і датчиків КВП до клемної коробки виконує Виробник СГУ.

3) Заземлення електрообладнання та приладів повинно виконуватися згідно з вимогами ГОСТ 21130-75, ГОСТ 12.2.007.0 і ПУЕ на раму КВП СГУ.

### ***2.3. Розрахунок сухого газового ущільнення***

Методики розрахунку газових ущільнень всіх типів базуються на теорії газового змащення.

Першою фундаментальною роботою, в якій були викладені теорії розрахунку і конструювання газодинамічних ущільнень, стала теорія розрахунку і проектування опор зі спіральними канавками, є робота Віппла [10]. Ця робота була опублікована в 1949 році. В роботі для опису моделі використовувалися рівняння Рейнольдса. Було зроблено декілька припущень, таких як нехтування стисливістю плівки, нескінченна кількість канавок, плоскопаралельний зазор, потік газу є ламінарним та ізотермічним. Ця теорія стала основою для всіх подальших теоретичних досліджень. Подальшою науковою роботою стала праця Мюйдермана [11]. У цій роботі були описані основні принципи теоретичних досліджень та практичного застосування.

У більшості випадків передбачалося, що деформація ущільнювальних поверхонь була відсутня. Методики розрахунку, засновані на цьому припущенні, були створені для визначення ущільнюючої ефективності. Але

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48



існує також велика кількість теоретичних досліджень для визначення впливу деформації на ефективність ущільнення. В цьому випадку деформація представляється у вигляді конусності. Тобто деформація поверхні кільця представлена в лінійній формі. Провідні компанії беруть до уваги лише вплив конусності ущільнювального зазору на газодинамічні характеристики. Найбільш повний аналіз видів деформації сухого газового ущільнення міститься в роботі Лебека [12].

Існує багато методик розрахунку ущільнюючої пари, але зважаючи на велику кількість факторів, які можуть вплинути на кінцевий результат, особливого значення набуває експериментальна доводка таких ущільнень.

У кожного виробника сухих газових ущільнень існує ряд типорозмірів ущільнюючих пар. Саме з підбору типорозміру ущільнюючої пари починається проектування СГУ. Основним критерієм по підборі ущільнюючої пари є місце установки СГУ, а саме діаметр валу та корпусу.

Метою розрахунку є визначення основних характеристик ущільнюючого зазору, величину жорсткості газової плівки, витрати газу через ущільнення і потужності газодинамічного тертя. У процесі розрахунку визначаються власна частота коливань торця і його биття в осьовому напрямку, теплота ізотермічного процесу розширення газу і теплота тертя, величина зазору  $\delta_1$  в ущільнювальній парі з урахуванням биття торця і ізотермічної течії газу, розподіл тиску газу уздовж радіуса.

Алгоритм розрахунку ущільнюючого зазору показаний на рис. 2.3 [6].

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

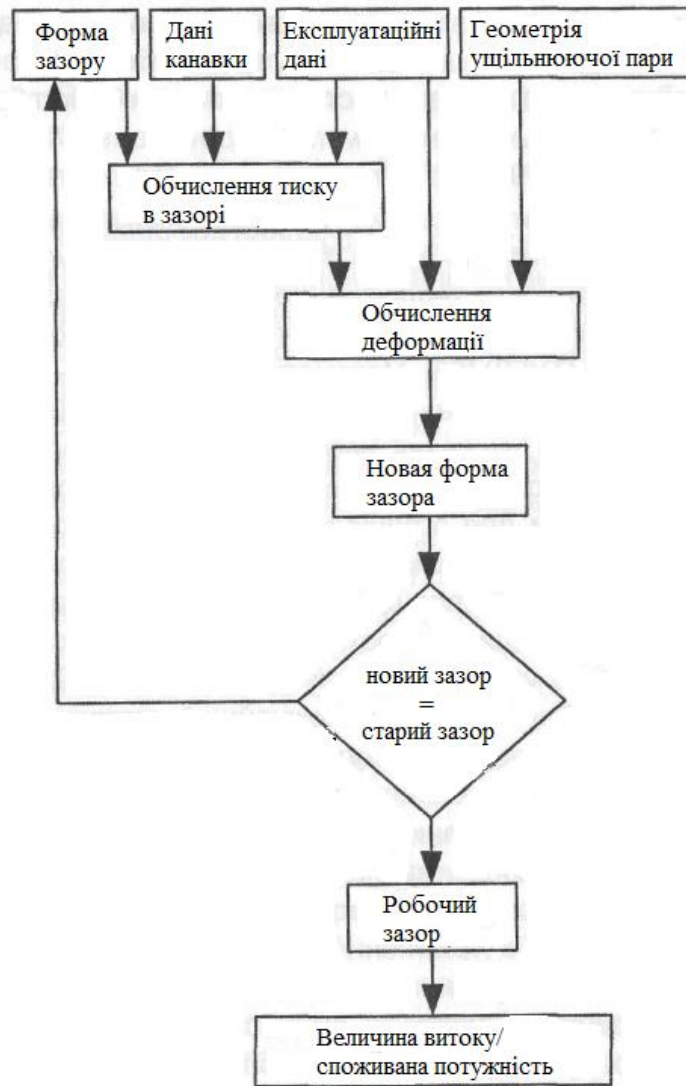


Рис. 2.3 – Розрахунок ущільнюючого зазору

Метод дослідження аналітичний з використанням сучасних програмних комплексів.

### 2.3.1. Основні рівняння руху в'язкого газу

Для розв'язання зазначених задач використовуються основні рівняння руху в'язкого газу з деякими припущеннями [3].

Рівняння стану:

$$\frac{p}{c} = z \cdot R \cdot T \quad (2.1)$$

де  $z$  – коефіцієнт стисливості.

Рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{U}) = 0 \quad (2.2)$$

Рівняння руху Нав'є – Стокса [7]:

$$\rho \cdot \frac{d\vec{U}}{d\phi} = \rho \cdot \vec{F}_M - \operatorname{grad} \left( p + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \operatorname{div}(\mu \cdot \dot{S}) \right), \quad (2.3)$$

де  $\dot{S}$  – тензор швидкостей деформації.

Рівняння для політропного процесу ідеального газу:

$$\frac{p}{\rho^n} = \operatorname{const} \quad (2.4)$$

Рівняння теплопровідності:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial \phi} = \operatorname{div}(\lambda \cdot \operatorname{grad} T), \quad (2.5)$$

де  $c$  – питома теплоємність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності.

### 2.3.2. Основні припущення

У більшості випадків газ можна вважати суцільним середовищем. Критерієм є число Кнудсена:

$$K_n = \frac{l_a}{\delta} \cdot \frac{p_a}{p}, \quad (2.6)$$

де  $l_a$  - довжина вільного пробігу молекул газу при тиску навколишнього середовища  $p_a$ ;  $\delta$  – товщина зазору.

При  $K_n < 0,01$  газ можна розглядати як суцільне середовище.

При русі газів у вузькому зазорі їх можна вважати ньютонівськими рідинами, для яких характерна лінійна залежність між напругами і швидкостями деформацій. Для течії газу в зазорі між двома площинами, що переміщуються одна відносно іншої зі швидкістю  $U$ , можна записати:

$$y = \mu \cdot \frac{d\vec{U}}{dy}, \quad (2.7)$$

де  $y$  – координата в напрямку нормалі до поверхні тертя.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Коефіцієнт в'язкості газів істотно залежить від температури (і слабо від тиску). Значення  $\mu$  у залежності від температури можна визначити за формулою Сезерленда:

$$\mu = \mu_0 \cdot \frac{273+C}{T+C} \cdot \left(\frac{T}{273}\right)^{1.5}, \quad (2.8)$$

де  $\mu_0$  – коефіцієнт в'язкості при 273К та 0,1012 МПа; С – константа Сезерленда [8].

Вважаємо, що в'язкість газу по всій області течії постійна, тобто  $\mu = const$ , оскільки температура газу майже постійна по всьому об'єму зазору.

Зневажаємо силою ваги частинок газу, тому що власна маса частинок газу мала.

### 2.3.3. Розрахунок розподілу тисків газу вздовж радіуса в зазорі ущільнювальної пари

Розподіл тисків уздовж радіуса може бути знайдений із розв'язування системи основних рівнянь руху в'язкого газу з урахуванням прийнятих припущень чисельним методом. Наприклад, у [8] пропонується таке диференціальне рівняння зміни тиску  $p$  за радіусом  $r$ :

$$\frac{d\bar{p}}{d\bar{r}} = -\lambda'_{СП} \cdot A \cdot \frac{A_0 + A_1 \cdot \lambda'_{n} + A_2 \cdot \lambda'_{n}{}^2}{B_0 + B_1 \cdot \lambda'_{n} + B_2 \cdot \lambda'_{n}{}^2} \cdot \bar{r} + \frac{\nu_{СП}{}^3 [\alpha + \beta \cdot \nu_{СП}{}^3 + \alpha^2 \cdot \lambda'_{n}]}{2 \cdot [B_0 + B_1 \cdot \lambda'_{n} + B_2 \cdot \lambda'_{n}{}^2 \cdot \ln\left(\frac{R_{СП}}{R_B}\right)]} \cdot \frac{\bar{p}_{СП} - 1}{\bar{r} \cdot \bar{p}}, \quad (2.9)$$

де

$$\bar{p} = \frac{p}{p_H}; \quad \bar{r} = \frac{r}{R_n}; \quad \lambda = \frac{6 \cdot \mu \cdot \omega \cdot R_H^2}{p_n \cdot \delta_1^2};$$

$$\lambda'_{n} = \frac{\pi \cdot \lambda'_{СП} \cdot \bar{r}^2 \cdot \sin^2 \theta_{СП}}{(1 + \xi)^2 \cdot N_{СП} \cdot \bar{p}}; \quad \bar{R}_{СП} = \frac{R_{СП}}{R_H}; \quad \bar{R}_B = \frac{R_B}{R_H};$$

$$\bar{p}_{СП} = \frac{p_{СП}}{p_H}; \quad A = \beta \cdot \gamma \cdot \nu_{СП} \cdot \cos \theta_{СП} \cdot \sin \theta_{СП};$$

$$\beta = \frac{\eta_1}{\eta_1 + \eta_2}; \quad \gamma = \frac{\delta_{СП}}{\delta_1 + \delta_{СП}}; \quad \xi = \frac{\delta_2 - \delta_1}{\delta_1}; \quad \nu_{СП} = 1 - \gamma;$$



формулу (2.10):

$$\bar{P}_{ГЛ} = \sqrt{\left(\bar{P}_B^2 + (\bar{P}_{СП}^2 - \bar{P}_B^2) \cdot \frac{\ln(r/R_B)}{\ln(R_{СП}/R_B)}\right)} \quad (2.10)$$

### 2.3.4. Визначення витрати газу через ущільнення

Масова витрата знаходиться за рівнянням:

$$G_{СП} = \frac{\pi \cdot p_H^2 \cdot \delta_1^2}{12 \cdot R_{Г} \cdot T \cdot \mu} \cdot (1 + \xi^2) \cdot \left[12 \cdot m_0 + (1 + \xi) \cdot (\bar{p}_{СП} + 1) \cdot \frac{\bar{p}_{СП} - \bar{p}_B}{\ln(R_{СП}/R_B)}\right] \quad (2.11)$$

де  $R_{Г}$  – газова постійна;

$T$  – температура газу в зазорі;

$$m_0 = \frac{l_a}{\delta_1}$$

### 2.3.5. Визначення несучої здатності та жорсткості газового шару

Несуча здатність газового шару дорівнює сумі несучих здатностей для ділянки з канавками і рівної ділянки:

$$F_{СП} = 2 \cdot p \cdot R_H^2 \cdot p_H \cdot \left(\int_{\bar{R}_{СП}}^1 \bar{p} \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r} + \int_{\bar{R}_B}^{\bar{R}_{СП}} \bar{p}'_{ГЛ} \cdot \bar{r} \cdot d\bar{r}\right) \quad (2.12)$$

Твердість газового шару дорівнює похідній від несучої здатності по величині зазору  $\delta_1$ :

$$K_{СП} = \frac{dF_{СП}}{d\delta_1} \quad (2.13)$$

### 2.3.6. Визначення потужності газодинамічного тертя

Потужність, затрачувана на газодинамічне тертя в зазорі ущільнювальної пари:

$$N_{ТР} = M_{ТР} \cdot \omega \quad (2.14)$$

Момент тертя  $M_{ТР} = M_1 + M_2$ ,

де  $M_1$  – момент тертя у зоні розташування канавок;  $M_2$  – момент тертя в

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рівній зоні.

Елементарний момент тертя в рівній зоні:

$$dM_{\text{ТР}} = dF_{\varphi} \cdot r = \mu \cdot \left( \frac{dU_{\varphi}}{dy} \right) \cdot r^2 \cdot dr \cdot d\varphi \quad (2.15)$$

Виконуючи інтегрування, знаходимо момент тертя, а потім за формулою (2.14) – потужність тертя.

### **2.3.7. Визначення теплоти ізотермічного процесу розширення газу**

$$Q_{\text{із}} = G_{\text{СП}} \cdot R_{\text{Г}} \cdot T \cdot \ln \cdot \left( \frac{P_{\text{СП}}}{P_{\text{В}}} \right) \quad (2.16)$$

Для забезпечення ізотермічного процесу розширення газу теплота  $Q_{\text{із}}$  повинна дорівнювати потужності газодинамічного тертя  $N_{\text{ТР}}$ :

$$Q_{\text{із}} = N_{\text{ТР}} \quad (2.17)$$

### **2.3.8. Проведення розрахунків**

Розрахунок газодинамічного ущільнення зі спіральними канавками представлений вище можна виконати за допомогою програми “RSGU”.

Вихідні дані для розрахунку приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні дані для розрахунку

Параметр	Позначення	Значення
Коефіцієнт в'язкості газу	$\mu$ , Па*с	$1,15 \cdot 10^{-5}$
Частота обертання	$\omega$ , об/хв	5565
Зовнішній радіус кільця	$R_{\text{Н}}$ , мм	140,25
Внутрішній радіус кільця	$R_{\text{В}}$ , мм	114,7
Радіус, на якому закінчуються канавки	$R_{\text{СП}}$ , мм	127,1
Кут утворюючої спіралі	$\Theta$ , град.	16
Тиск на зовнішньому радіусі кільця	$P_{\text{Н}}$ , МПа	5,17

Продовження таблиці 2.2

Параметр	Позначення	Значення
Тиск на внутрішньому радіусі кільця	$P_B$ , МПа	0,12
Температура газу у зазорі	$T$ , К	300
Глибина спіральної канавки, мм	$\delta_{СП}$ , мм	0,01
Довжина вільного проб. молекул при тиску $P_A$	$l_a$ , мкм	0,06
Тиск оточуючого середовища	$P_A$ , МПа	0,1
Радіус розвантаження	$R_y$ , мм	119
Газова стала газу	$R_K$ , Дж/кг*К	507
Число канавок	$N$ , шт	12

**Результати розрахунку**

В таблиці 2.3 приведені дані зміни відношення тиску  $P/P_H$  по радіусу при різних значеннях зазору в області спіральних канавок (рівняння 2.9).

Таблиця 2.3 – Зміни відношення тиску  $P/P_H$  в області спіральних канавок

$R/R_H$	Зазор $\delta_1$ , мкм			
	3,33	4,33	5,33	6,33
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.9951	1.0048	1.0028	1.0017	1.0011
0.9901	1.0097	1.0056	1.0034	1.0011
0.9852	1.0145	1.0084	1.0051	1.0032
0.9803	1.0192	1.0112	1.0068	1.0043
0.9753	1.0240	1.0139	1.0084	1.0054
0.9704	1.0287	1.0166	1.0101	1.0064
0.9655	1.0334	1.0194	1.0117	1.0074
0.9605	1.0381	1.0221	1.0133	1.0085
0.9556	1.0428	1.0247	1.0149	1.0095



Продовження таблиці 2.3

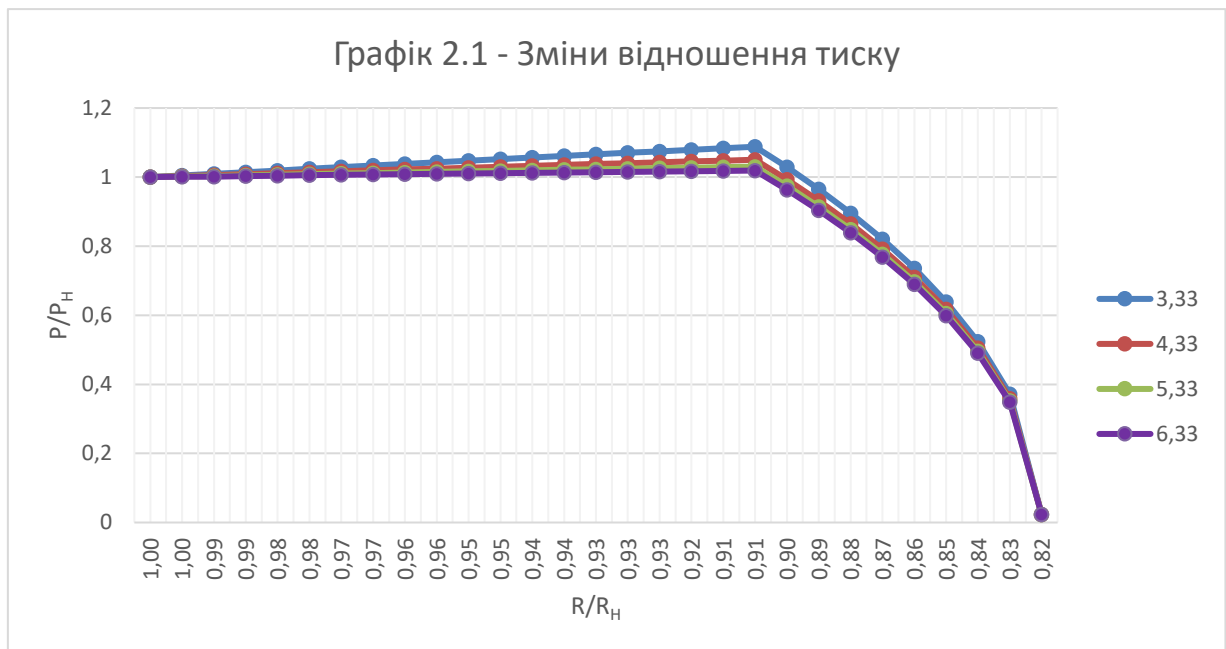
0.9507	1.0474	1.0274	1.0165	1.0105
0.9457	1.0520	1.0300	1.0181	1.0115
0.9408	1.0566	1.0326	1.0197	1.0125
0.9358	1.0611	1.0352	1.0212	1.0135
0.9309	1.0657	1.0378	1.0228	1.0144
0.9260	1.0702	1.0404	1.0243	1.0154
0.9260	1.0746	1.0429	1.0258	1.0163
0.9161	1.0791	1.0454	1.0273	1.0173
0.9112	1.0835	1.0479	1.0288	1.0182
0.9062	1.0879	1.0504	1.0303	1.0191

В таблиці 2.4 приведені дані зміни відношення тиску  $P/P_H$  по радіусу при різних значеннях зазору в гладкій області ущільнення (рівняння 2.9).

Таблиця 2.4 – Зміни відношення тиску  $P/P_H$  в гладкій області ущільнення

$R/R_H$	Зазор $\delta_1$ , мкм			
	3,33	4,33	5,33	6,33
0.9062	1.0879	1.0504	1.0303	1.0191
0.8964	1.0286	0.9931	0.9741	0.9635
0.8866	0.9648	0.9316	0.9138	0.9039
0.8768	0.8958	0.8650	0.8484	0.8392
0.8669	0.8202	0.7919	0.7768	0.7684
0.8571	0.7358	0.7104	0.6968	0.6893
0.8473	0.6391	0.6171	0.6053	0.5988
0.8375	0.5236	0.5055	0.4959	0.4905
0.8276	0.3717	0.3589	0.3521	0.3483
0.8178	0.0232	0.0232	0.0232	0.0232

Отримані дані змін тиску по радіусу з таблиць 2.3 та 2.4 представлені на графіку 2.1.



З графіка 2.1 помітно, що найбільший тиск  $P=5,62$  МПа діє на торець при  $R/R_H = 0,9062$ , що еквівалентно  $R_{СП} = 127,1$  мм. Це та область, на якій закінчується канавка.

Інші параметри ущільнення приведені в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Характеристика ущільнення

Параметр	Зазор $\delta_1$ , мкм			
	3,33	3,33	3,33	3,33
Число Кнудсена	0.00035	0.00027	0.00022	0.00018
Параметр стисливості	13.8	8.1	5.4	3.8
Максимальний тиск в ущільненні, МПа	5.62443	5.43048	5.32657	5.26894
Масова витрата газу через ущільнення, кг/с	0.003541	0.007220	0.012892	0.021029
Сила попереднього стиснення пружин, Н	107.7	107.7	107.7	107.7

Продовження таблиці 2.5

Сила стиснення пружин, Н	5500.8	3207.0	1973.6	1288.5
Жорсткість газового слою, МН/м	2293.80	1233.40	685.01	
Потужність тертя, Вт	334.6	257.7	209.7	177.2
Теплота процесу ізометричного розширення газу, Вт	2071.9	4186.5	7437.5	12097.3

Аналізуючи результати розрахунку можна зробити висновок, що при зазорі 3,33 мкм досягається максимальна жорсткість газового шару та мінімальний витік, що в свою чергу є ключовим параметром стабільної роботи ущільнення, а також підтверджується теорія того, оптимальна ширина зазору  $\delta_1$  складає 2...4 мкм, так як зі збільшенням зазору жорсткість газової плівки зменшується а витік зростає.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

### 3. Технологічний розділ

#### 3.1. Аналіз службового призначення деталі

Корпус внутрішній входить до першого ущільнюючого ступеня та призначений для утримання торця. При цьому забезпечується можливість осьового ходу торця, а також його фіксація від провороту. Герметизація корпусу між розточкою кришки та торцем забезпечується за допомогою вторинних ущільнень у вигляді O-кілець.

Корпус внутрішній повинен мати жорстку конструкцію, щоб уникнути деформацій під дією тиску. В залежності від умов роботи для виготовлення корпусу внутрішнього використовуються різні сталі. В даному випадку при помірному тиску та не агресивного середовища допускається використання сталі 20X13 ГОСТ 5632-2014.

Основними поверхнями корпусу внутрішнього є посадковий діаметр в кришку компресора та посадкове місце під торець та проміжне кільце.

#### 3.2. Розрахунок припусків і розмірів заготовки

Визначення припусків здійснюється за допомогою нормативних матеріалів (Табл. 3.1) [16].

Таблиця 3.1 – Розрахунок операційних розмірів

Маршрут обробки поверхні корпусу внутрішнього Ø306h7	Квалітет	Операційний розмір, мм	Припуск на Ø, мм
Точіння чистове	7	Ø306 <sub>-0.057</sub> (h7)	3
Точіння чорнове	12	Ø309 <sub>-0.57</sub> (h14)	11
Заготовка – прокат сталь 20X13	16	Ø320 <sup>+3,0</sup> <sub>-5,0</sub>	

### 3.3. Розробка маршрутної технології

Маршрутна технологія типового технологічного процесу наведена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2. – Послідовність виконуваних операцій

№ операції	Найменування операції
005	Відрізна
010	Токарна
015	Токарна з ЧПУ
020	Контроль ОТК
025	Координатно-сверлильна
030	Контроль ОТК

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

#### 4. Розділ автоматизації для проектованого обладнання

Метою автоматизації системи сухих газових ущільнень так і ГПА вцілому є підвищення надійності, ефективності та безпеки їх експлуатації. Непередбачені поломки призводять до суттєвих економічних витрат, пов'язаних із витратами на непланові ремонти, відновлення порушеного технологічного процесу. Для забезпечення безаварійної роботи газокомпресорних станцій потрібно здійснювати безперервний моніторинг технічного стану систем які входять до складу газоперекачувальних агрегатів.

У системі сухих газових ущільнень контроль та сигналізація здійснюється за великою кількістю параметрів. Основні з них включені в систему аварійно-попереджувального захисту та сигналізації.

До них відносяться:

- контроль забрудненості фільтроелемента, передавання на ЦПУ сигналу 4...20 мА про величину перепаду тиску на фільтрі;
- контроль перепаду тиску між тиском буферного газу, що подається в ущільнення, і тиском технологічного газу, що транспортується, в ділянці ущільнень (перепад тиску "газ-газ"), передавання на ЦПУ сигналу (4...20 мА) про величину перепаду тиску "газ-газ";
- контроль тиску бар'єрного повітря, передавання на ЦПУ сигналу 4...20 мА про величину тиску бар'єрного повітря перед дроселем;
- контроль давления за первой ступенью уплотнения, передача на ЦПУ сигнала 4...20 мА о величине давления;
- сигналізація на ЦПУ про розрив мембрани (сухий контакт).

Розглянемо норми технологічного контролю (табл. 4.1) та алгоритми роботи системи газових ущільнень.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Таблиця 4.1 – Норми технологічного контролю системи СГУ

Номер позиції	Найменування параметра; позначення приладу	Норм. значення, Од. вим.	Значення блокування та сигналізації				Дія
			НН	Н	L	LL	
PDT-01	Перепад тиску на фільтрі <i>Yokogawa EJA110A</i> (0...400 кПа, вихідний сигнал 4...20 мА)	<100 кПа		250			ПС: "СГУ. Забруднений попередній фільтр буферного газу "
PDT-02	Перепад тиску на фільтрі <i>Yokogawa EJA110A</i> (0...400 кПа, вихідний сигнал 4...20 мА)	<100 кПа		250			ПС: "СГУ. Забруднений фільтр тонкого очищення буферного газу "
PDT-05	Перепад тиску "газ-газ"; <i>Yokogawa EJA110A</i> (0...150 кПа, вихідний сигнал 4...20 мА)	30...50 кПа		51			ПС: "СГУ. Високий перепад тиску «газ-газ»"
					29		ПС: "СГУ. Низький перепад тиску «газ-газ»"
						20	АО: "СГУ. Перерва в подачі буферного газу "
FIT-03; FIT-04	Витрата буферного газу на подачі в СГУ <i>Yokogawa RAMC01</i> (0...1000 норм.м <sup>3</sup> /год; вихідний сигнал 4...20 мА)	300...350 нм <sup>3</sup> /год			250		ПС:"СГУ. Зменшення подачі буферн. газу"
FI-08; FI-09	Витік через І-й ступінь вузла СГУ; <i>Yokogawa RAMC01</i> (0,6-12 норм.м <sup>3</sup> /год)	до 9 нм <sup>3</sup> /год					

Продовження табл. 4.1

PIT-10; PIT-11	Тиск після I-го ступеня СГУ <i>Yokogawa EJA530A</i> (0...600 кПа, вихідний сигнал 4...20 мА)	50 кПа	200	ПС:"СГУ. Високий тиск за I-м ступенем"
			300	АО:" СГУ. Розгерметизація I-го ступеня "
PIT-14	Тиск бар'єрного повітря <i>Yokogawa EJA530A</i> (0...250 кПа, вихідний сигнал 4...20 мА)	40...60 кПа	39	ПС:" СГУ. Зменшення подачі розділового повітря"
			30	АО:" СГУ. Перерва в подачі бар'єрного повітря"
ES-15 ES-16	Датчик розриву мембрани типу ДРП-1 («сухий» контакт)	Нормально замкнутий	Розрив контакту	АО:" Порушена мембрана прориву"

**Алгоритми роботи системи сухих газових ущільнень.**

PDT-01 ( $H \geq 250$  кПа) - "СГУ. Забруднений фільтр".

- Вручну на КВП СГУ перейти на резервний фільтр буферного газу, замінити фільтроелемент.

PDT-02 ( $H \geq 250$  кПа) - "СГУ. Забруднений фільтр".

- Вручну на КВП СГУ перейти на резервний фільтр буферного газу, замінити фільтроелемент.

PDT-05 ( $H \geq 51$  кПа) - "СГУ. Високий перепад тиску «газ-газ»".

- За допомогою РПД виставити необхідне значення перепаду.

PDT-05 ( $L \leq 29$  кПа) - "СГУ. Низький перепад тиску «газ-газ»".

- Переконатися, що різниця тисків на вході і виході нагнітача:  $(P_{BC} - P_H) \geq 300$  кПа.

- За допомогою РПД виставити необхідне значення перепаду.

PDT-05 ( $LL \leq 20$  кПа) - "СГУ. Перерва в подачі буферного газу".

- Під час роботи: аварійна зупинка агрегату зі скиданням тиску з контуру;

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64



- Перед пуском: блокування можливості заповнення контуру нагнітача природним газом.

FIT-03; FIT-04 ( $L \leq 250$  нм<sup>3</sup>/год) - "СГУ. Зменшення подачі буферного газу".

- Переконалися, що різниця тисків на вході і виході нагнітача:  $(P_{BC} - P_H) \geq 3$  кг/см<sup>2</sup>.

- За показаннями PDIT-05 перевірити значення перепаду тиску "газ-газ". Якщо  $\Delta P_{Г-Г} \neq 03-0,5$  кг/см<sup>2</sup>, за допомогою РПД виставити необхідне значення перепаду.

- Якщо  $\Delta P_{Г-Г} = 0,3...0,5$  кг/см<sup>2</sup>, вручну на КВП СГУ за допомогою вентилів ВН-121; ВН-122 встановити потрібну витрату буферного газу на подачі у вузли СГУ.

РТ-10; РТ-11 ( $H \geq 200$  кПа) - "СГУ. Високий тиск за I-м ступенем"

- перед пуском: демонтаж і ревізія вузла СГУ.

РТ-10; РТ-11 ( $H \geq 300$  кПа) - "СГУ. Розгерметизація I-го ступеня"

- Аварійна зупинка агрегату зі скиданням тиску з контуру.

ES-15; ES-16 (розрив контакту) - "СГУ. Розгерметизація I-го ступеня"

- Аварійна зупинка агрегату зі скиданням тиску з контуру. Замінити мембрану прориву.

РІТ-14 ( $H \geq 60$  кПа) - "СГУ. Високий тиск бар'єрного повітря"

- вручну на КВП СГУ за допомогою редуктора тиску РД установити необхідний тиск бар'єрного газу на подачі у вузли СГУ

РІТ-14 ( $L \leq 39$  кПа) - "СГУ. Низький тиск бар'єрного повітря"

- вручну на КВП СГУ за допомогою редуктора тиску РД установити необхідний тиск бар'єрного газу на подачі у вузли СГУ

РІТ-14 ( $LL \leq 30$  кПа) - "СГУ. Перерва в подачі бар'єрного повітря"

- під час роботи: аварійна зупинка агрегату без скидання тиску з контуру;

- Перед пуском: блокування можливості заповнення контуру нагнітача природним газом.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## **5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях**

Так як сухі газові ущільнення використовуються на компресорних станціях та інших підприємствах у складі відцентрових компресорів, то розглянемо небезпечні і шкідливі фактори при роботі ГПА на основі відцентрового компресора та газотурбінного приводу.

### **5.1. Аналіз шкідливих факторів під час роботи ГПА на основі ВК і ГТП**

#### **5.1.1. Основний перелік заходів безпеки під час роботи та обслуговування ГПА**

Вимоги безпеки до експлуатації ГПА, що приводиться в дію газовою турбіною авіаційного типу, визначаються ризиком вибуху транспортованого газу, його високим тиском, наявністю високооборотного двигуна та нагнітача, розташованого в контейнері обмеженої місткості.

Основним завданням забезпечення безпеки при експлуатації ГПА є запобігання небезпечних явищ, пов'язаних з транспортуємим газом. Природний газ не має забарвлення, легший за повітря, майже не токсичний (у випадку відсутності шкідливих домішок), не має яскраво вираженого запаху і при певній концентрації може утворювати вибухонебезпечні суміші з повітрям.

Метан є основним компонентом природних і попутних нафтових газів, вміст якого може досягати 80-90% в залежності від родовища. Вміст вуглекислого газу в природному газі зазвичай не перевищує 6-7%, азоту - 10%. Вміст сірководню в деяких природних і попутних нафтових газах є шкідливим. Крім метану, Нафтовий газ містять значну важких вуглеводнів таких як етан, пропан, бутан та інші компоненти.

Метан має наступні фізичні властивості:

Відносна густина за повітрям (за 20 °С)	0,554
Густина (за 0 °С та 1 кгс/см <sup>2</sup> ), кг/м <sup>3</sup>	0,717

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Температура займання, °С 650-670

Гранично допустима за санітарними нормами (СН 245-71) концентрація в повітрі робочої зони (у перерахунку на вуглець), мг/м<sup>3</sup> 300

Межі вибуховості в суміші з повітрям, об.% 5-15

Гранично допустимий вміст у повітрі робочої зони, об.%.  
за звичайних умов експлуатації До 1  
при проведенні вогневих робіт 0,5

Через домішки важчих вуглеводнів властивості природного газу змінюються: підвищується густина, знижується температура займання, концентрації вибухонебезпечної суміші з повітрям, отже, і допустимий об'ємний вміст у повітрі робочої зони.

В чистому вигляді метан і етан не отруйні, але при низькій концентрації кисню в повітрі можуть викликати задуху. Перші ознаки нездужання проявляються при концентрації метану в повітрі приблизно 25-30 об. %. Ознаки отруєння парами вуглеводнів, які входять до складу природного газу, - нездужання і запаморочення. Наступним етапом настає ефект сп'яніння, який може супроводжуватись супроводжується галюцинаціями, сміхом, з послідуною втратою свідомості.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин у повітрі робочої зони наведені в ДСТУ 12.1.005-88 "Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони". В деяких родовищах природного газу, а також газоконденсатних родовищах може бути присутній сірководень. Цей газ безбарвний та має характерний запах тухлих яєць. Запах сірководню стає відчутним при вмісті в повітрі 0,0014-0,0023 мг/л.

Його вміст в транспортуючому газі не повинен перевищувати 0,02 мг/м<sup>3</sup>. Сірководень є сильною отрутою та належить до високонебезпечних шкідливих речовин, та має згубну дію на нервову систему. При концентрації в повітрі 0,01-0,015 об. % сірководню відбувається легке отруєння, за 0,1-0,3 об. % - отруєння зі смертельними наслідками [22]. Гранично допустимий вміст

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сірководню в робочій зоні за санітарними нормами 10 мг/м<sup>3</sup>, а в суміші з вуглеводнями - не більше 3 мг/м<sup>3</sup>.

Обслуговування обладнання, зокрема його пуск, зупинку і регламентні роботи, необхідно здійснювати відповідно до вимог технічних інструкцій заводу-виготовлювача. Експлуатація ГПА з параметрами, що мають відхилення від значень, зазначених в інструкції з експлуатації, не допускається.

До експлуатації та ремонту газоперекачувальних агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 і ГПА-Ц-16 допускається обслуговуючий персонал, який має спеціальну підготовку, склав іспити і допущений у встановленому порядку до їх обслуговування та експлуатації.

Перед пуском ГПА повинен спрацювати звуковий сигнал при натисканні кнопки "Пуск".

Пуск агрегату без спеціальних огорожень та захисних кожухів на обертових деталях і вузлах які перебувають на висоті від рівня підлоги не більш як 2 м (торсіонний вал, вентилятори блока маслоохолоджувача, муфта насосів), або демонтаж їх під час роботи агрегату не допускається.

Під час роботи ГПА заборонено:

- заходити у відсік двигуна під час його запуску та роботи;
- проводити роботи на ГПА, коли система перебуває під струмом;
- проводити роботи у всмоктувальній камері та вихлопній шахті агрегату під час запуску або під час роботи двигуна;
- працювати з відкритими дверима відсіку двигуна, нагнітача, ВОУ і всмоктувальної камери.

Повітря в маслобаку необхідно щодня перевірятися на вміст горючих газів із послідуочим записом у журналі. При наявності горючих газів у маслобаку агрегату більше 1 об. % робота ГПА не допускається.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

Перебування обслуговуючого персоналу біля працюючого агрегату без засобів індивідуального захисту від шуму більше 1 год протягом однієї робочої зміни не допускається.

Допустимий рівень вібрації газотурбінної установки, вимірюваний штатною апаратурою, не повинен перевищувати 60 мм/с.

Герметична перегородка, яка встановлена між відсіками двигуна і нагнітача, повинна забезпечувати відсутність перетікання повітря з відсіку нагнітача у відсік двигуна.

Перед подачею гарячого повітря від двигуна для обігріву відсіків агрегату необхідно сповіщати про це персонал, що працює у відсіках. Під час роботи з арматурою гарячого повітря слід використовувати захисні рукавиці.

У випадку відключення електроенергії необхідно використовувати станційні переносні світильники напругою 12 В у вибухонебезпечному виконанні.

Взимку майданчики обслуговування ГПА слід періодично очищати від льоду і снігу.

Аварійне зупинення агрегату має бути здійснене в таких випадках: у разі загрози безпеці обслуговуючого персоналу або поломки агрегату; появи металевих стуків та ударів; сильних витоків мастила або газу; займання мастила або газу; помпажних явищ в агрегаті.

Перед проведенням ремонтних робіт по агрегату з контуру нагнітача має бути стравлено газ і в місцях розміщення арматури та пускових пристроїв мають бути вивішені плакати "Не вмикати, працюють люди".

Роботи з налаштування двигуна можуть проводитися тільки на зупиненому агрегаті. Регламентні та ремонтні роботи з двигуном повинні проводитися тільки після охолодження його зовнішніх поверхонь до температури 45 °С. Під час збирання і розбирання агрегату необхідно використовувати справний спеціальний інструмент та пристосування, що гарантують безпечне ведення робіт. Забороняється: використовувати

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

несправний підйомний механізм і пристосуванням для підйому двигуна, кришки компресора, ротора та інших складальних одиниць агрегату; залишати деталі на вантажопідіймальних механізмах в підвішеному стані; експлуатувати вантажопідіймальні механізми при температурі нижче мінус 20 °С.

У вантажопідйомних механізмах які працюють у парі повинно бути рівномірне навантаження, щоб уникнути виходу їх з ладу та запобігти травматизму персоналу.

Під час розконсервації та миття деталей слід користуватися негорючими технічними мийними засобами.

Забороняється в контейнерах або поблизу агрегату зберігати легкозаймисті матеріали, такі як гас, бензин та інші.

Забороняється експлуатація установки пожежогасіння, якщо збіг термін чергового огляду балонів, а також якщо виявлено дефекти, що виключають гарантію безпечної роботи установки. Транспортувати установку за наявності в балонах вогнегасної речовини забороняється.

Входити у відсіки двигуна і нагнітача після спрацьовування системи пожежогасіння без протигаза дозволяється тільки після ретельного їх провітрювання і взяття проб загазованості у відсіку.

Для визначення вмісту шкідливих речовин у повітрі робочої зони повинні проводитися контрольні вимірювання методом відбору проб не рідше 1 разу на рік.

На дверях відсіку двигуна, всмоктувальної камери і повітроочисного пристрою мають бути нанесені заборонні знаки безпеки, виконані за ГОСТ 12.4.026-76 "Кольори сигнальні і знаки безпеки", з пояснювальним написом "При роботі ГПА не входити".

Виконання перерахованих вище вимог необхідне для безпечної та надійної експлуатації всього обладнання газоперекачувальних агрегатів з авіаційним приводом.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

### **5.1.2. Заходи щодо зниження шуму і вібрацій**

Під час роботи компресорної установки шум створюють зворотні клапани, фільтри на всмоктувальній лінії, частини, що обертаються, зубчасті передачі обладнання, робочі середовища, що рухаються трубопроводами, а також несправні та зношені деталі. Шуми також виникають під час продувки емностей і трубопроводів. Якщо швидкість повітряного потоку перевищує 5 м/с виникають додаткові шуми у клапанах, вигинах трубопроводів та інших місцях де виникає супротив. Шум від роботи компресора зазвичай поширюється через трубопроводи, а також через каркаси будівлі та інші конструкції. Шум має негативний вплив на здоров'я обслуговуючого персоналу компресорних установок. Робота в умовах шуму може викликати поступову втрату слуху, а в подальшому і працездатність обслуговуючого персоналу. В тому випадку, коли обслуговуючий персонал не почує сигнали контрольно-вимірювальних приладів, а також засобів автоматики, це може призвести до травм і до аварійних ситуацій компресорної установки.

Рівень шуму на постійних робочих місцях у виробничих приміщеннях і на території підприємств згідно із санітарними нормами проектування промислових підприємств і ГОСТ 12.1003-83 "Шум – общие требования безопасности" під час тривалої безперервної роботи компресорів не повинен перевищувати 85 дБ за шкалою "А". У випадку перевищення цього рівня, необхідно застосовувати заходи щодо зниження виробничого шуму до встановленої величини. Це можна здійснити наступним шляхом:

- установка компресорів у звукоізоляційній камері;
- застосування віброізолюючих основ будівельних конструкцій будівлі компресорної станції;
- застосування звукоізолюючих прокладок у місцях з'єднання компресора з повітропроводами та іншими частинами, а також спеціальних глушників на повітропроводах продувки посудин і вихлопу повітря в атмосферу;
- встановлення металевих щитів і фільтрів всмоктування повітря;

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

- покриття глушників, стін і дахів у приміщенні компресорної станції звукопоглинальними матеріалами;

- машиністам рекомендується застосовувати спеціальні шоломи з навушниками.

### **5.1.3. Запобіжні пристрої від підвищення тиску**

Кожна ємність (порожнина комбінованої ємності), що перебуває під тиском, має бути забезпечена запобіжними пристроями від підвищення тиску вище допустимого значення. Як запобіжні пристрої застосовуються:

- 1) Пружинні запобіжні клапани;
- 2) Важільно-вантажні запобіжні клапани;
- 3) Імпульсні запобіжні пристрої (ІЗП), що складаються з головного запобіжного клапана (ГЗК) і керуючого імпульсного клапана (ІЗК) прямої дії;
- 4) Запобіжні пристрої з мембранами, що руйнуються (мембранні запобіжні пристрої);
- 5) Інші пристрої, застосування яких погоджено з Держнаглядом України.

Конструкція пружинного клапана повинна унеможливлувати затягування пружини понад установлену величину, а пружина повинна бути захищеною від неприпустимого нагріву (охолодження) і безпосередньої дії робочого середовища, якщо воно чинить шкідливий вплив на матеріал пружини; повинна передбачати пристрій для перевірки справності дії клапана в робочому стані шляхом примусового відкриття його під час роботи.

Допускається встановлення запобіжних клапанів без пристосування для примусового відкриття, якщо останнє небажане за властивостями середовища (вибухонебезпечне, горюче, а також речовини 1 і 2 класу небезпеки) або за умовами технологічного процесу. У цьому разі перевірка спрацьовування клапанів повинна здійснюватися на стендах.

Кількість запобіжних клапанів, їхні розміри та пропускна спроможність мають бути обрані за розрахунком так, щоб у ємності не створювався тиск, який перевищує надлишковий робочий тиск більш ніж на 0,05 МПа (0,5

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72



кгс/см<sup>2</sup>) для ємностей тиском до 0,3 МПа (3 кгс/см<sup>2</sup>), на 15% - для ємностей із тиском від 3 до 6,0 МПа (30... 60 кгс/см<sup>2</sup>), і на 10% - для ємностей із тиском понад 6,0 МПа (60 гкс/см<sup>2</sup>).

Коли запобіжні клапани працюють, допускається перевищення тиску в посудині не більше ніж на 25% робочого за умови, що це перевищення передбачено проектом і відображено в паспорті посудини.

Пропускна спроможність запобіжного клапана визначається відповідно до ГОСТ 12.2.085 «Сосуды, работающие под давлением. Клапаны предохранительные. Требования безопасности».

Запобіжний пристрій підприємством виробником має поставлятися з паспортом та інструкцією з експлуатації. У паспорті поряд з іншими відомостями повинен бути вказаний коефіцієнт витрати клапана для стисливих і нестисливих середовищ, а також площа, до якої він віднесений. Запобіжні пристрої повинні встановлюватися на патрубках або трубопроводах, безпосередньо до ємності. Приєднувальні трубопроводи запобіжних пристроїв (підвідні, відвідні та дренажні) повинні бути захищені від замерзання в них робочого середовища.

Мембранні запобіжні пристрої встановлюються:

1) замість важільно-вантажних і пружинних запобіжних клапанів. Коли ці клапани в робочих умовах конкретного середовища не можуть бути застосовані внаслідок їхньої інерційності або інших причин;

2) перед запобіжними клапанами у випадках, коли запобіжні клапани не можуть надійно працювати внаслідок шкідливого впливу робочого середовища (корозія, ерозія, полімеризація, кристалізація, прилипання, замерзання) або можливих витоків через закритий клапан вибухо- і пожежонебезпечних, токсичних, екологічно шкідливих речовин. У цьому разі має бути передбачено пристрій, що дає змогу контролювати мембрани;

3) паралельно із запобіжними клапанами для збільшення пропускної здатності систем скидання тиску;

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

4) на вихідному боці запобіжних клапанів для запобігання шкідливого впливу робочих середовищ з боку скидної системи і для виключення впливу коливань протитиску з боку цієї системи на точність спрацьовування запобіжних клапанів.

Необхідність і місце встановлення мембранних запобіжних пристроїв та їхню конструкцію визначає проектна організація. На виготовлення мембран підприємство повинно мати дозвіл органів Держнагляду.

У кожній запобіжній мембрани повинно бути заводське клеймо із зазначенням тиску спрацьовування, допустимої робочої температури експлуатації. Паспорт видається на всю партію однотипних мембранних клапанів, що направляються одному споживачеві. Разом з паспортом має бути додана технічна документація на противакуумні опори, на живі леза, затискачі, інші елементи, у зборі з якими допускаються в експлуатацію мембрани цієї партії.

Паспорт має бути підписаний керівником підприємства - виробника, підпис якого скріплюється. Мембранні запобіжні пристрої повинні розміщуватися в місцях, відкритих і доступних для огляду, монтажу і демонтажу, приєднувальні трубопроводи повинні бути захищені від замерзання в них робочого середовища, а пристрій повинен встановлюватися на патрубках або трубопроводах, безпосередньо приєднаних до посудини. Під час установа мембранного запобіжного пристрою послідовно із запобіжним клапаном (перед клапаном або за ним) порожнину між мембраною і клапаном має сполучатися відвідною трубкою з манометром (для контролю справності мембран). Запобіжні мембрани повинні встановлюватися тільки в призначені для них затискні пристосування.

Результати перевірки справності запобіжних пристроїв, відомості про їх налаштування записуються в змінний журнал про роботу посудин особами, які виконують зазначені операції.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

#### **5.1.4. Заземлення компресорних установок**

Під час експлуатації компресорних установок, що мають електропривод, можливі випадки, коли металеві частини устаткування, які нормально не є струмоведучими і не перебувають під напругою, внаслідок пошкодження ізолювальних пристроїв електрично з'єднуються з елементами ланцюга електричного струму. Дотик до таких частин обладнання обслуговуючого і ремонтного персоналу без спеціальних засобів захисту може призвести до нещасного випадку.

Для забезпечення безпеки обслуговуючого і ремонтного персоналу в компресорній відповідно до вимог «Правил устроювання електроустановок» (ПУЕ) повинні бути споруджені заземлювальні пристрої, до яких повинні бути підключені металеві частини електроустановок і корпуси електроустаткування, які в результаті порушення ізоляції можуть опинитися під напругою.

Заземлення електроустановок необхідно виконувати за напруги 500 В і вище змінного і постійного струму - у всіх випадках, за будь-яких напруг змінного і постійного струму - у вибухонебезпечних приміщеннях.

Заземленню підлягають: корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників; приводи електричних апаратів; вторинні обмотки вимірювальних трансформаторів; каркаси розподільчих щитів, щитів управління та шаф; металеві конструкції розподільчих пристроїв, металеві корпуси кабельних муфт, металеві оболонки та броні контрольних і силових кабелів, металеві оболонки дротів, сталеві труби, електропровідники та інші металеві конструкції, пов'язані зі встановленням електроустаткування; металеві корпуси пересувних і переносних електроприймачів.

Заземленню не підлягають: корпуси електровимірювальних приладів і реле, установлених на металевих щитах, у шафах, а також у розподільних пристроях; електроприймачі з подвійною ізоляцією. Кожен заземлювальний елемент установки має бути приєднаний до заземлювача або заземлювальної

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		75

магістралі за допомогою окремого відгалуження. Не допускається послідовне включення в заземлювальний провідник декількох заземлювальних частин установки.

Заземлювальні провідники приєднують до корпусу компресора та апаратів за допомогою зварювання або надійного болтового з'єднання. Кінці заземлювальних гнучких провідників, що застосовуються для приєднання до корпусів обладнання, апаратів, повинні мати наконечники. Заземлювальні провідники мають бути захищені від корозії. Відкрито прокладені оголені провідники і мережі заземлення повинні бути пофарбовані в чорний колір. Кожен заземлювальний пристрій, що перебуває в експлуатації, повинен мати паспорт, який містить схему заземлення, його основні технічні дані, дані про результат перевірки стану заземлювального пристрою, про характер виконаних ремонтів і заземленнях, внесених у пристрій заземлення. Вимірювання опорів заземлювальних пристроїв цехових електроустановок повинно проводитися не рідше одного разу на рік. Позапланові вимірювання опорів заземлювальних пристроїв повинні проводитися після їх реконструкції або капітального ремонту.

## **5.2. Розрахунок захисного заземлення**

Згідно з вимогами ГОСТ 12.1.030 "ССБТ. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление", ГОСТ 12.1.019 "ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты" заземленню підлягають: корпуси електричних машин, трансформаторів, апаратів, світильників та інше обладнання (наведене вище), включно з лініями електромережі для підключення ЕОМ.

Захисне заземлення виноситься за межі приміщення, де знаходиться обладнання. Поблизу будівлі виривається траншея глибиною 0,7-0,8 м, у яку вбивають захисні заземлювачі, що виконуються у вигляді труб діаметром 3-5 см і завдовжки 2,5-3 м, на відстані від 1 м до 3 м.

Опір розтіканню струму в одному заземлювачі визначаємо за формулою:

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76

$$R_{TP} = 0,366 \cdot \frac{\rho}{l} \left( \lg \frac{2l}{d} + 0,5 \lg \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (5.1)$$

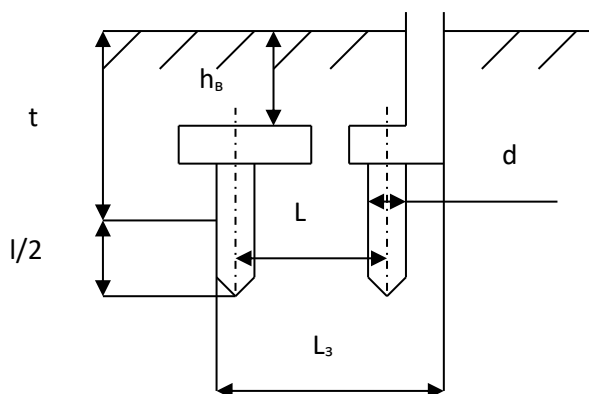


Рис.4.1. Схема заземлювального пристрою.

де  $\rho$  - електричний опір землі,  $\rho = 20$  Ом м табл.8.14 [18];

$l$  - довжина заземлювача,  $l = 3$  м;

$d$  - діаметр заземлювача,  $d = 0.05$  м;

$t$  - відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача;

$$t = h_B \cdot \frac{l}{2} = 0.7 \cdot \frac{3}{2} = 1.05 \text{ (м)},$$

де  $h_B$  - глибина викопаної траншеї,  $h_B = 0.7$  м.

Тоді маємо:

$$R_{TP} = 0.366 \cdot \frac{20}{3} \left( \lg \frac{2 \cdot 3}{0.05} + 0.5 \lg \frac{4 \cdot 1.05 + 3}{4 \cdot 1.05 - 3} \right) = 6.02 \text{ (Ом)}.$$

Групове розташування вертикальних заземлювачів чинить взаємний вплив полів розтікання (екранування) струму, збільшуючи опір розтікання струму. З урахуванням коефіцієнтів сезонності та екранування кількість заземлювачів визначається за формулою:

$$n = \frac{R_{TP}}{R_d \cdot \eta_e \cdot \psi}, \quad (5.2)$$

де  $R_d$  - допустимий опір розтікання струму заземлення,  $R_d = 4$  Ом;

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						77
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$\eta_e$  - коефіцієнт екранування,  $\eta_e = 0.6$  табл.16.4 [19];

$\psi$  - коефіцієнт сезонності,  $\psi = 1.1$  табл. 8.13 [18].

Тоді маємо:

$$n = \frac{6.02}{4 \cdot 0.6 \cdot 1.1} = 2.3.$$

Приймаємо кількість заземлювачів рівною 2шт.

Для зв'язку вертикальних електродів і як самостійний горизонтальний електрод застосовують смугову сталь завширшки 20-40 см і товщиною 4 мм.

Довжина з'єднувальної пластини:

$$L_{пл} = 1.05 \cdot L(n - 1), \quad (5.3)$$

де  $L$  - відстань між заземлювачами,  $L=3$ м.

Значить:

$$L_{пл} = 1.05 \cdot 3(2 - 1) = 3.15(\text{м}).$$

Опір розтікання струму в сполучній пластині можна визначити:

$$R_{пл} = 0.366 \cdot \frac{\rho}{L_{пл}} \lg \frac{2 \cdot L_{пл}^2}{h_B \cdot b \cdot \eta_{пл}}, \quad (5.4)$$

де  $b$  - ширина сполучної пластини,  $b=0.004$ м;

$\eta_{пл}$  - коефіцієнт екранування сполучної пластини,  $\eta_{пл} = 0,4$  табл.16.5 [83].

Тоді маємо:

$$R_{пл} = 0.366 \cdot \frac{20}{3.15} \lg \frac{2 \cdot 3.15^2}{0.7 \cdot 0.04 \cdot 0.4} = 7.55(\text{Ом}).$$

Загальний опір розтіканню струму заземлювачів і сполучної пластини:

$$R_z = \frac{1}{\frac{1}{R_{TP}} + \frac{1}{R_{пл}}} \leq R_d \quad (5.5)$$

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						78
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_3 = \frac{1}{\frac{1}{5.02} + \frac{1}{7.55}} = 1.80 \text{ м} < 40 \text{ м}.$$

За розрахунком, наведеним вище, загальний опір розтіканню струму заземлення склав 1.8 Ом, що достатньо для безпечної експлуатації обладнання.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
						79
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ***Висновок***

В даній кваліфікаційній роботі були розглянуті основні принципи та методи проектування систем сухих газових ущільнень які можна розділити на наступні етапи:

1. Проведено детальний аналіз типових конструкцій сухих газових ущільнень та контрольно-вимірювальних панелей. Розглянутий принцип роботи сухих газових ущільнень, процеси які відбуваються в ущільнювальному зазорі та які фактори впливають на надійну роботу ущільнюючої пари. Вивчені властивості матеріалів, їхня стійкість до агресивних середовищ і здатність витримувати різні температурні умови та навантаження тиском.

2. Виходячи з габаритних розмірів місця установки СГУ в компресор, визначено основні розміри ущільнюючої пари та проведено її розрахунок з послідуочим аналізом отриманих результатів. Виділено основні вимоги до конструктивного та матеріального виконання КВП СГУ.

3. Розглянуто призначення основних деталей СГУ та технологію їхнього виробництва.

4. Запропоновано рекомендації щодо моніторингу та контролю системи СГУ для забезпечення тривалої та надійної її роботи.

5. Виконано аналіз шкідливих факторів під час роботи системи СГУ в складі ГПА з ВК і ГТД, а також розраховано захисне заземлення.

Для проектування сухих газових ущільнень використано сучасні інженерні підходи та технології. Проектування профілю ущільнюючої пари було оптимізовано для максимальної ефективності та довговічності її роботи. Враховано різноманітні умови експлуатації, такі як склад газу, тиск, температура та інші фактори, що можуть впливати на роботу ущільнення.

Отримані результати вказують на високий рівень значимості та мають можливість успішного впровадження в промисловість.

					<i>КМ 14.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		80



Ця робота служить важливим внеском в область проектування сухих газових ущільнень, надаючи не лише теоретичний аналіз, а й практичні рекомендації для впровадження отриманих результатів у виробництво. З використання отриманих результатів також можуть бути розроблені нові системи під різні умови експлуатації.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

### *Список використаної літератури*

1. Новиков Е.А. Газодинамические уплотнения: монография / Е.А. Новиков; М-во образ. и науки России, Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. – 252с.
2. Максимов В.А., Баткис Г.С. Трибология подшипников и уплотнений жидкостного трения высокоскоростных турбомашин. Казань: ФЭН, 1998. – 428 с
3. Методичні вказівки до курсового і дипломного проектування на тему „Сухі газові ущільнення роторів турбомашин” / Укладачі Ю.Б. Гальоркин, М.В. Калінкевич, М.Г. Крившич. - Суми: Вид-во СумДУ, 2004.-28с.
4. Шайхутдинов А.З. Разработка и модернизация газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом / Под редакцией В.А.Максимова. – Казань: ООО «Слово», 2007. – 339 с.
5. Гритцнер Э., Гуляев А.А. Отличительные особенности сухих уплотнений EAGLEBURGMANN // Территория нефтегаз. – 2010. - №6. – С. 114 – 116.
6. Gas-Lubricated Mechanical Seals // Оглядова інформація фірми Burgmann. 1997. – 75 p.
7. Dry Gas Sealing Systems for Axial, Centrifugal, Rotary Screw Compressors and Expanders // API STANDARD 692 FIRST EDITION American Petroleum Institute, JUNE 2018 – 258 p.
8. Максимов В.А., Хадиев М.Б., Хисамеев И.Г., Галиев Р.М. Бесконтактные уплотнения роторов центробежных и винтовых компрессоров: Учебное пособие. Казань: ФЭН, 1998. – 291 с.
9. Ден Г.Н. Термогазодинамика сухих торцевых газовых уплотнений роторов турбомашин. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2003. – 290 с.
10. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978.- 736 с.
11. Пешти Ю.В. Газовая смазка: Пособие для вузов.- М.: Изд-во МГТУ 1993.- 381 с.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		82

12. Whipple, R.T.R. "Herringbone Pattern Thrust Bearing", AERE. Report, 1949 T/M 29.
13. Muijderman, E.A. "Spiral groove bearings", Springer – Verlag, Berlin, 1996 Chap. 3.
14. Lebeck, A.O. "Principles and Design of Mechanical Face Seals", John Wiley & Sons, New York, 1991, Chap. 4, 6.
15. Голубев, А.И., Кондаков, Л.А. "Уплотнения и Уплотнительная техника" - Москва, 1986 - 464 с.
16. Барцев И.В., Музалевский В.И., Милославский Д.А. Опыт эксплуатации «сухих» компрессоров природного газа // Газотурбинные технологии № 6 (33), 2004. - С. 46-47.
17. Технология компрессоростроения. Учебник. Н.А. Ястребова, А.И. Кондаков. М.: Маш. 1987.-336 с.
18. "Средства защиты в машиностроении. Расчет и проектирование." Справочник под ред. С.В.Белова: М: "Машиностроение" 1989г, 365 с.
19. "Охрана труда. Учебное пособие" под ред. Я.И.Бедрия: ЦУЛ 2002г, 321 с.
20. Юдин Е.Я. Охрана труда в машиностроении. Уч. для вузов. М., «Машиностроение», 1976, с.335.
21. Инструкция по охране труда машиниста компрессорных установок” № 42-75.
22. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. и др. Борьба с шумом на производстве (справочник) М. машиностроение 1985 с.400
23. ГОСТ 12.1.005-88. Предел допустимых концентраций вредных веществ в рабочих зонах.

					КМ 14.00.00.00 ПЗ	Арк.
Эм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		83