

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Сумський державний університет  
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій  
Кафедра технічної теплофізики

«До захисту  
допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій  
ВАНСЄВ  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_  
2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**на здобуття освітнього ступеня магістр**  
зі спеціальності 142 «Енергетичне машинобудування»,  
освітньо-професійної програми «Компресори, пневмоагрегати та вакуумна  
техніка»

на тему: Дослідження впливу геометричних параметрів на робочі  
характеристики відцентрового компресорного ступеня на основі  
моделювання течії

Здобувача(ки) групи К.м-21

Ковалев Е. В.

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на  
відповідне джерело.

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (Ім'я та ПРІЗВИЩЕ здобувача)

Керівник \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (посада, науковий ступінь, вчене звання, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Консультант \_\_\_\_\_

## Зміст

1. Вступ	3
2. Об'єкт та мета дослідження	3
3. Перелік та порівняльні характеристики сталей, які застосовуються в середовищі які містять нітрозні гази і вибір матеріалу	4
4. Обґрунтування конструкції колеса	9
5. Класифікація корозійних процесів	15
6. Результати розрахунків	42
7. Розділ охорони праці	56
Висновки	70
Список літератури	71
Додаток А	73

					КМ 05.00.00.00 ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата				
Разраб.		Ковалев Е.В.			Відцентровий нагнітач	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Бага В.М.					2	
Реценз.						СумДУ К.м-21		
Н. Контр.		Шарапов С.О.						
Утверд.		Ванєєв С.М.						

## Вступ

Багатогранне застосування уніфікованого багатоцільового нагнітача включає в себе не тільки стиснення повітря, але і використання технічних газів. Попит на такі нагнітачі в різних галузях промисловості дуже високий, особливо в металургії, хімічній промисловості і т. д.

Технічні гази розрізняються головним чином по їх впливу на конструкційні матеріали і викликають їх корозію. Технічний газ може бути слабким і сильнокорозійним. До першої категорії відносяться злегка димні гази, а також густі гази, що містять азотівуглекислий газ. До другої категорії відносяться субгаз, флокуляція, доменний газ, і багато інших.

Застосування уніфікованої конструкції до таких газів передбачає використання загальної уніфікованої основи, але вимагає використання антикорозійних матеріалів головним чином для деталей, що контактують з газом, головним чином для роторів з проточними частинами і робочих коліс.

Протягом декількох століть метали і сплави на їх основі були основними конструкційними матеріалами. Але практично всі конструкційні метали схильні до корозії навколишнього середовища. В результаті вони втрачають свої експлуатаційні характеристики. Часто в результаті корозії окремих елементів виходить з ладу вся конструкція. Зокрема, величезні втрати через корозію в нафтовій, газовій, хімічній промисловості, залізничному, морському тарічковому транспорті.

Цілі і завдання дослідження

Ротор відцентрового нагнітача і його елементи є, перш за все, відповідальним вузлом нагнітача, і до них пред'являються підвищені вимоги, як при виробництві, так і в процесі експлуатації.

Метою даного дослідження є ротор відцентрового нагнітача V-104b, який працює в середовищі, що містить суміш нітритного газу.

Технічні параметри ротора наступні:

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$P_{\text{вс.}} = 0,9 \text{ атм.}$$

$$P_{\text{нагн.}} = 3,5 \text{ атм.}$$

$$n = 15936 \text{ об/хв}$$

$$V_{\text{н}} = 6780 \text{ нм}^3/\text{год}$$

$$N_{\text{вигр.}} = 450 \text{ кВт}$$

$$t_{\text{поч.}} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{кін.}} = 155 \text{ }^\circ\text{C}$$

Відсотковий зміст (масовий) компонентів робочого середовища наступний:

$$\text{NO}_2 - 11,7\%$$

$$\text{NO} - 1,9\%$$

$$\text{O}_2 - 14\%$$

$$\text{N}_2 - 48,9\%$$

$$\text{CO}_2 - 3,5\%$$

$$\text{N}_2\text{O} - 17,8\%$$

$$\text{H}_2\text{O} - 3,0\%.$$

Метою даного дослідження є розробка рекомендацій щодо вибору матеріалів і конструкції робочого колеса ротора відцентрового нагнітача V-104b при виготовленні і ремонті.

Перелік і порівняльні характеристики сталей, використовуваних в середовищах, що містять газоподібні нітрити.

Через високу агресивність нітритного газу практично все обладнання і трубопроводи установок, що працюють в такому середовищі, виготовлені з високоміцної нержавіючої кислотостійкої сталі.

При оцінці корозійної стійкості використовується 10-бальна шкала (ГОСТ 13819-68), яка визначає стійкість металу до рівномірної корозії.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для виготовлення апаратури і трбопроводів слід обирати матеріали, які мають стійкість не нижче 5 балів ([6] ст. 341).

Фірма GHH – Виробник компресора V-104B використав при виготовленні відцентрових колес ротора сталь N 4550 X 10 Cr Ni N6189.

Хімічний склад і механічні властивості цієї сталі наведені в таблиці 1

Таблиця 1

Марка сталі	C	Si	Mn	Cr	Ni	Nb	$\sigma_{02}$	$\sigma_B$	$\delta_5$	$\psi$
							МПа		%	
N 4550 X10CrNiN6189	<0,12%	0,4	0,5	18	9,5	-	270	550 ÷ 750	40	50

На підставі аналізу ряду літературних джерел складений перелік вітчизняних сталей найбільш часто використовуваних в середовищах, які мають у своєму складі нітрозні гази.

Указаний перелік наведений в таблиці 2, в якій знаком «+» показано використання сталі в певному середовищі, а розташованою нижче цифрою – бал стійкості.

Механічні властивості використаних сталей наведені в таблиці 3.

Напруги які допускаються в сталевих дисках компресорів:

$$\sigma_{r \text{ MAX}} = (550 \dots 650) \text{ МПа}, \sigma_{t \text{ MAX}} = (550 \dots 650) \text{ МПа. ([8], ст. 244)}$$

Відповідно з розрахунком на міцність диску робочого колеса (Додаток 1) в умовах роботи ротора максимальна діюча напруга в диска складає:

$$\sigma_{t \text{ MAX}} = 456 \text{ МПа}$$

Із сталей, наведених в таблиці 3 при такій нарузі можуть бути використані сталі 09X16H4B та 14X17H2.

Керуючі матеріали ([5], ст. 482 та [7], ст. 65) при роботі компресорного обладнання на нітрозних газах віддають перевагу сталі 14X17H2, яка є типовою та поширеним представником хромонікелевих корозійностійких сталей мартенситоферритного класу.

Поковка із сталі 14X17H2 застосовується для виготовлення високоміцних деталей обладнання хімічних заводів, а також деталей компресорних машин для роботи на нітрозному газі при робочих температурах не вище 400 - 450 °С.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

Таблиця 2

Корозійне середовище	Марка сталі																			Діагностичне релє	
	06X13	12X13	20X13	06X18H10T	06X18H8H2T	06X21H6M2T	06X22H6T	09X16H4B	09X16H15M36	ЮХ17НІЗМ2Т	ЮХ17НІЗМ3Т	12Х18Н9Т	12Х18Н10Т	12Х21Н6Т	14Х17Н2	15Х18НІ2С4ТЮ	06Х22Н6Т	03Х19АГ3НЮ	06Х18Т1		
1. Нітратні гази з парами води і кисня при Р = 1300 кН/м <sup>2</sup> (140°C)	+	+		+		+	+			+	+		+	+							[11] Ст. 186
2. Нітрозні гази конденсат слабкий азотної кислоти (до 15%)												+	+	+							[9] Ст. 3
3. Виробництво капролактаму					+	+												+			[10] Ст. 145
4. Виробництво азотної кислоти (азотна к-та 47-49%; окисли NO+NO <sub>2</sub> 5.4:6%)																		+	+	+	[6] Ст. 246
5. Теплоносій NO		+						+	+		+				+	+					[3] Ст. 276
6. HNO 0,2: 0,3% NO 1,2% нітрон						+			+		+				+	+					[3] Ст. 278
7. NO			+		+		+	+		+		+	+	+	+	+					[2] Ст. 218

Таблиця 3

N		Марка сталі			b						
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КМ 05.00.00.00 ПЗ						Лист
											7

п/п		МПа		%	
1	08X13	392	539	14	35
2	12X13	392	539	14	35
3	20X13	441	588	14	40
4	08X18HIOT	196	490	35	40
5	08X18Г8Н2Т	265	588	За згодою	
6	08X21H6M2T	343	539	18	37
7	08X22H6T	343	539	18	35
8	09X16H4Б	784	931	7	35
9	09X16HI5M36				
10	IOX17HI3M2T	196	510	36	47
11	IOX17HI3M3T	196	510	36	45
12	I2X18H9T	196	510	37	44
13	I2X18HIOT	196	510	36	46
14	I2X21H5T				
15	14X17H2	539	686	13	35
16	15X18HI2C4TЮ	382	715	За згодою	
17	08X22H6T	343	539	19	37
18	03X19AГ3HIО				
19	08X18TI		460	30	



## Обґрунтування конструкції колеса

В принципі, конструкція колеса може бути виготовлена за допомогою пайки, зварювання та клепок. Rephrase Для паяння відцентрового колеса сплав ПЖК 1000 має стійкість 0,001/м год при 350 о для оксидів азоту в навколишньому середовищі. ст. 55. 88 вказує на те, що стійкість припою ПЖК не менша, ніж у матеріалу колеса, в оксидах азоту, оскільки сталь 14X17N2 в аналогічних умовах залишається надзвичайно стабільною при 0,002/м·год. Механічні властивості круга зі сталі 14X17N2 можна отримати тільки зварюванням, оскільки режим термічної обробки не забезпечує необхідних механічних характеристик. Крім того, аустенітні ферити сталі 14X17N2 в основному аналогічні співвідношенню двох формоутворюючих елементів у даному розплаві при високій температурі та значно зростають вище 1100 оС (t пайки = 1250 °С). На кількість фериту в цьому металі в основному впливають ці три фактори. Особливо при роботі з великими за розмірами напівфабрикатами механічні властивості деталей із структурно вільного фериту в мартенситній матриці стають більш анізотропними. Колесо, виготовлене зі сталі 14X17N2, не підходить для пайки, як зазначено вище. Зварні з'єднання з цієї сталі виявляють знижену стійкість до міжкристалітної і загальної корозії в зоні ураження зварюванням ([5], ст. 482). Найчастіше використовуються колеса 14X17N2 зі сталевим рифленням і корозійностійким пластиком 12X18N10Т через їх міцність і стійкість до корозії. Коли крильчатка виготовлена таким чином, матеріал кожного диска зберігає властивості, притаманні заготовкам, і на нього не впливає теплопровідність, як це визначено шляхом випробування механічних властивостей отриманих з них зразків.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

## Розрахунок на міцність диска робочого колеса

Основні вихідні дані

Матеріал диску – сталь 14X17H2

Межа плинності –  $\sigma_t = 65 \text{ кг/мм}^2$

Межа міцності –  $\sigma_b = 80 \text{ кг/мм}^2$

Частота обертання –  $n = 16100 \text{ об/хв}$

Зовнішній діаметр –  $D_a = 382 \text{ мм}$

Діаметр втулки –  $d_i = 98 \text{ мм}$

Кут входу лопаток –  $\alpha_{вх} = 23^\circ$

Кут виходу –  $\alpha_{вих} = 42^\circ$

Товщина лопаток –  $t = 7 \text{ мм}$

Число лопаток –  $z = 17$

Ширина втулки –  $B_o = 56 \text{ мм}$

### 1.1 Розрахунок напруженого стану

Диск є складним компонентом робочого колеса, який коливається через складну систему сил. Rephrase Крім відцентрових сил від власної маси, існують також сили, що утворюються в результаті взаємодії елементів колеса та посадки на вал при високих температурах. (1) (4) використовується для наближеного розрахунку радіального та дотичного напруження шляхом врахування бічного напруження від робочих лопатей. Замість стандартного профілю цей диск замінений на ступінчастий, що складається з шести секцій, які залишаються рівномірно тонкими. Література з даної теми була використана для складання розділів із цілого. Визначення є результатом використання методу двох обчислень для проведення обчислень. Ступінь натягу в місці розташування диска на валу. Напряга в диску змінюється зі збільшенням швидкості і напруги. При кожному оберті на диску виникає постійна напруга. Нерухомий диск відчуває навантаження через бічні сили приземлення. Для цього виконується два розрахунки диска від обода до втулки

–

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

один при робочому числі обертів  $n$ , напруги на периферії  $\sigma_{ra} = 0$ , і довільно обраної напруги  $\sigma_{ta} = 100$  МПа;

другий розрахунок – для нерухомого диска при  $\sigma_{ra} = 0$  і довільно обраної напруги  $\sigma_{ta} = 50$  МПа.

Для визначення напруги при переході від одної ділянки диску до сусідньої покладається, що по товщині диску напруги розповсюджуються рівномірно.

Радіальні напруги на стику ділянок повинно змінюватися зворотно пропорційно товщині їх, тобто  $\sigma_r, n+1 = \sigma_{rn} \cdot \frac{r_n}{r_{n+1}}$ . Тангенціальна напруга перераховується по формулі –

$$\sigma_t, n+1 = \sigma_{tn} + \nu (\sigma_r, n+1 - \sigma_{rn})$$

Результати розрахунку напруги в диску представлені в таблиці 1 і Рис. 1. Необхідні коефіцієнти обчислювались згідно вказаної методики.

По величині  $\sigma_{ti}$  визначається  $\sigma_{ti}^*$  при заданому вільному числі обертів по формулі

$$\sigma_{ti}^* = \left(\sigma_{ti} \frac{n^*}{n}\right)^2 \quad (1)$$

де  $n^*$  - вільне число обертів.

$\sigma_{ti}$  – напруга на втулці.

1) Натяг обчислюється за формулою

$$\Delta = \frac{X_i}{E} \left[ \sigma_{ti} - \frac{\rho \omega^{*2}}{4} (1 - \nu) X_i \right]$$

де  $X_i$  – радіус втулки;

$\rho$  – густина матеріалу колеса;

$\omega^*$  - частота обертання, при якій натяг дорівнює нулю;

$\nu$  – коефіцієнт Пуассона.

2) Напруга на будь-якому радіусі диску при робочому числі обертів і величині натягу  $\Delta$  обчислюються за формулою

$$\sigma_r = \sigma_r^I + K_2 \sigma_r^{II}$$

$$\sigma_t = \sigma_t^I + K_2 \sigma_t^{II}$$

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

$$K_2 = \frac{\frac{E \Delta}{Xi} - \sigma_{ti}^I + \sigma_{ri}^I + B}{\sigma_{ti}^{II} - \sigma_{ri}^{II}}$$

3) Максимальна напруга, яка визначає міцність колеса – тангенціальна напруга на втулці при вільному числі обертів згідно формулі (1)

$$\sigma_{ti} = 453,4 \text{ Мпа}$$

Приймаємо вільне число обертів

$$n^* = 18900 \text{ об/хв}$$

Обчислимо, використовуючи результати розрахунку:

$$K1 = \frac{\sigma_{ri}^I}{\sigma_{ri}^{II}} = -\frac{103.1}{-142.1} = 0.725$$

$$\sigma_{ti}^* = \sigma_{ti}^I + K1 \sigma_{ti}^{II} = 65.46 + 0.725 \cdot 367 = 331.2 \text{ МПа}$$

Максимальна напруга в диску при вільному числі обертів

$$\sigma_{ti}^* = \sigma_{ti} \left(\frac{n^*}{n}\right)^2 = 331.2 \left(\frac{18900}{16100}\right)^2 = 456 \text{ МПа}$$

Необхідний натяг при посадці (радіальній):

$$\Delta = \frac{0,049}{2,04 \cdot 10^5} \left[ 456 - \frac{7850 \cdot 1979,2^2}{4} \cdot 0,7 \cdot 0,049^2 \right] = 10,58 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 0,1058 \text{ м}$$

Коефіцієнт

$$K2 = \left( \frac{2,04 \cdot 10 \cdot 10,58 \cdot 10^{-5}}{0,049} - 65,46 + 103,1 + 9,376 \right) / (367 + 142,1) = 0,976$$

Де

$$B = \frac{\rho w^2}{4} (1 - \nu) Xi^2 = \frac{7850 \cdot 1686^2}{4} \cdot 0,7 \cdot 0,049^2 = 9.376$$

Напруги істинні при  $n=16100$  об/хв розраховуються за формулою:

$$\sigma_r = \sigma_r + K_2 \sigma_r^{II}$$

$$\sigma_t = \sigma_t + K_2 \sigma_t^{II}$$

і представлені в таблиці 1

4) Коефіцієнт

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

$$K_3 = \frac{\Delta E}{\chi_i(\sigma_{ti}^{II} - \sigma_{ri}^{II})} = \frac{10.58 * 10^{-5} * 2.04 * 10^5}{0.049 * (367 + 142.1)} = 0.88$$

Напруги в нерухомому диску при посадці визначаються за формулами

$$\sigma_{rni} = K_3 \sigma_{ri}^{II}$$

$$\sigma_{tni} = K_3 \sigma_{ti}^{II}$$

і представлені в таблиці 1.

Максимальні радіальні напруги мають місце в колесі при роботі його на робочих обертах в началі закріплення лопаток

$$\sigma_{r \max} \cong \frac{218.9 + 171.3}{2} = 195.1 \text{ МПа}$$

Максимальні тангенціальні напруги – у місці посадки на вал.

При робочих обертах їх величина  $\sigma_{t \max} = 416.7 \text{ МПа}$ . При вільному числі обертів  $n^* = 18900 \text{ об/хв}$  максимальна тангенціальна напруга  $\sigma_{t \max}^* = 456 \text{ МПа}$

Допускаємі напруги (2), (4) для сталі 14Х17Н2  $[\sigma_t] = 650 \text{ МПа}$ .

Максимальні сумарні еквівалентні напруги на втулці колеса на робочій частоті обертання дорівнюють

$$\sigma_{\max}^* = \sqrt{\sigma_{rb}^2 + \sigma_{tb}^2} = \sqrt{416.7^2 + 33^2} = 418 \text{ МПа}$$

Запас міцності

$$n = \frac{[\sigma_t]}{\sigma_{\max}^*} = \frac{650}{418} = 1.555$$

відповідно, умова міцності для сталевих колес виконується.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

Таблиця 4 Напруга в дискі при робочому числі обертів

Діаметр, мм	Напруга	Перший розрахунок $\sigma r^I, \sigma t^I$	Другий розрахунок $\sigma r^{II}, \sigma t^{II}$ (n=0)	Істинна напруга, МПа (n=n роб)	Напруга від натягу припосадці $\sigma r_H, \sigma t_H$ (n=0)
382	$\sigma r_a$ $\sigma t_a$	0 100	0 50	0 147.9	0 44
276	$\sigma r'_1$ $\sigma t_1$ $\sigma r_1$ $\sigma t_1$	246.1 179.7 139.7 146.8	-22.9 72.9 -12.7 76.0	224.2 249.5 124.5 219.7	-20.1 64.1 -11.1 66.9
226	$\sigma r'_2$ $\sigma t_2$ $\sigma r_2$ $\sigma t_2$	251.3 173 197.2 156.5	-34.5 97.6 -27 100	218.9 266.7 171.3 252.3	-30.3 86.0 -23.8 88
176	$\sigma r'_3$ $\sigma t_3$ $\sigma r_3$ $\sigma t_3$	272.8 153.7 156.8 119.0	-68.2 141.2 -39.2 149.9	207.4 289.0 119.3 262.6	-60.0 124.2 -34.5 131.9
136	$\sigma r'_4$ $\sigma t_4$ $\sigma r_4$ $\sigma t_4$	209.5 112.5 108.3 82.4	-103 213.6 -53.5 228.4	109.6 317.1 57 301.3	-90.0 188.0 -47.0 201.0
110	$\sigma r'_5$ $\sigma t_5$ $\sigma r_5$ $\sigma t_5$	134.6 79.3 92.5 66.7	-128 303 -89.6 314.5	12.0 369.6 8.4 368.5	-112.6 266.6 -78.8 276.8
98	$\sigma r_i$ $\sigma t_i$	103.1 65.1	-142.1 367	-33 416.7	-125.0 323.0

## Класифікація корозійних процесів

Корозію класифікують:

1. за механізмом протікання;
2. за умовами протікання;
3. за характером корозійних поразок.

Залежно від механізму течії метали піддаються хімічній і електрохімічній корозії. Залежно від процесу найбільш поширеними були такі типи корозії. Псування газу у високотемпературному газовому середовищі. Солі, кислоти, луги та неелектронні елементи, такі як рідкий бром/розплавлена сірка або рідке паливо, є прикладами рідин, які піддаються корозії. У природному середовищі корозія може відбуватися в атмосфері або на установках з високим вмістом газу. Яскравим прикладом є підземна корозія. Виділення кислот та інших речовин бактеріями, цвіллю або грибками може призвести до мікробіологічної корозії, яка спостерігається в металевих конструкціях. Цей процес відбувається при вивільненні цих речовин. У вологому середовищі вологі ґрунти оточені морською водою. Структурна неоднорідність металу призводить до його корозії. Корозія кислот викликана наявністю графіту в чавуні та карбідів у сталі. Електрокорозія виникає, коли зовнішній струм діє через зовнішнє джерело. Блукаючий струм може спричинити корозію, проходячи через шляхи, які для цього не призначені, що може бути спричинено такими факторами, як порушення ізоляції електричних кабелів або неналежне заземлення електричних машин. Виникнення контактної корозії відбувається при контакті металів з різними потенціалами. Електронегативні метали здатні до корозії. За термоконтактну корозію відповідає гальванічний елемент з різницею температур на кінцях металопластикового або електролітично провідного середовища. Rephrase Корозія може виникнути в зазорах і тріщинах між металами, а також між неметалевими та металевими поверхнями через нерівне надходження кисню.

Кавітаційна корозія може відбуватися в рідкому середовищі з наявністю як кавітаційних, так і розбрикувальних мікропорожеч. Корозійна корозія

									Лист
									116
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

КМ 05.00.00.00 ПЗ

це руйнування металу, спричинене поєднанням сил тертя та корозії. Дивіться також корозія. Як постійні, так і змінні механічні напруги в поєднанні з корозійним середовищем призводять до корозії під напругою. Руйнування металу у вигляді тріщин викликано корозійною втомою при дії корозійних умов і механічних навантажень, які постійно змінюються або циклічні. Корозійне розтріскування спричинене одночасним впливом корозійного середовища та постійного натягу на металеві поверхні, що призводить до локального утворення тріщин. 3. Тип ушкоджень, викликаних корозією, визначає класифікацію загальної корозії. Суцільна і локальна корозія. Вся поверхня металу піддається безперервній або загальній корозії, як показано на рис. 1, етап 1. А с). Суцільна корозія може відбуватися рівномірно (див. рис. 1 А), нерівномірно (див. додатки (1, Б) і вибірково (показано на прим. ). Розчинення корозії в сплаві відбувається головним чином через її поширення на будь-яку частину структури, наприклад, розкладання латуні. Локальна корозія може впливати на окремі ділянки металу. Розрізняють наступні різновиди: На рис. 1 показано знищення корозії за допомогою окремих, відносно великих плям, як, наприклад, корозія, викликана латунню в морській воді. Фігура 1. Руйнування, викликане корозією, у вигляді виразок (рис. 1, д). Фігура 1. Снаряди, які знаходяться в металевих конструкціях на землі, відомі як окремі виразки. Корозія може бути спричинена точковою корозією, яка є явним руйнуванням, яке відбувається в точках, відокремлених від точки Пітта. Первинна ділянка поверхні залишається незмінною та стійкою (рис. 1, д). Ось як функціонують аустенітні нержавіючі сталі в морській воді.





Це локалізований процес корозії, який поширюється в льоду або піску, і може бути між- або транс-ізоляцією. Корозійне розтріскування алюмінієвих, магнієвих і мідних сплавів сильно корелює з різними умовами навколишнього середовища».

Воднева корозія або корозійна крихкість — це втрата металом міцності та пластичності внаслідок наводнювання металу. Наприклад, сталь у сирій нафті чутлива до водневої корозії. Відповісти на питання, який вид корозії найбільш небезпечний, неможливо. Для суворо визначених умов експлуатації продукту конкретні відповіді можуть бути надані в кожному конкретному випадку. Наприклад, точкова або точкова корозія найбільш небезпечна для резервуарів, труб або реакторів.

## ПОКАЗНИКИ ШВИДКОСТІ КОРРОЗИИ МЕТАЛІВ

Щоб визначити швидкість корозії металу в даному середовищі, прийнято спостерігати зміни будь-якої характеристики, яка об'єктивно відображає зміни властивостей металу. Такі характеристики (показниками) можуть бути, наприклад, зміни маси металу, об'єм газу, що виділяється, зміни механічних і електричних властивостей металу тощо. Вибір індикатора швидкості Корозія залежить як від цілей дослідження корозії, так і від найбільш прийнятної, а іноді й більш доступного методу вимірювання. Сучасне використання таких індикаторів досить велике, тому ми перерахуємо лише найбільш часто використовувані на практиці індикатори. Розрізняють прямі і непрямі показники швидкості корозії.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

## Прямі показники

**Показник зміни маси** - зміна маси зразка металу в результаті корозії, віднесене до поверхні металу  $S$  і часу  $\tau$ .

Залежно від умов корозії розрізняють:

а) негативний показник зміни маси

$$K^- = \frac{\Delta m}{S \cdot \tau}, \quad (3)$$

де  $\Delta m$  - спад маси металу за час корозії  $\tau$  після видалення продуктів корозії;

б) позитивний показник зміни маси

$$K^+ = \frac{\Delta m'}{S \cdot \tau} \quad (4)$$

де  $\Delta m'$  - збільшення маси металу за час корозії  $\tau$  внаслідок зростання плівки продуктів корозії.

**Об'ємний показник корозії** - обсяг поглиненого або виділеного в процесі корозії металу газу  $V_0$ , віднесений до одиниці поверхні металу і до одиниці часу:

$$K_{об} = \frac{V_0}{S \cdot \tau} \quad (5)$$

Обсяг газу зазвичай приводять до нормальних умов ( $T = 273 \text{ K}$ ;  $P = 1,033 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ).

**Токовий показник.** Для дослідження електрохімічної корозії металів зручно користуватися струминним показником  $i$  – анодної щільністю струму, що відповідає швидкості даного корозійного процесу.

На підставі закону Фарадея можна встановити зв'язок між струминним показником  $i$ ,  $A / \text{см}^2$

і негативним показником зміни маси

$K^-$  м, г / ( $\text{м}^2 \cdot \text{год}$ ):

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
						19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$i = \frac{K_{\text{м}} \cdot n \cdot F}{A \cdot 10000} = \frac{K_{\text{м}}}{A} \cdot n \cdot 2,68 \cdot 10^{-3}, (6)$$

де  $n$  - число електронів, що беруть участь в анодному процесі іонізації металу;  $F$  - постійна Фарадея, рівна  $26,8 \text{ А} \cdot \text{год} / \text{моль}$ ;  $A$  - атомна маса металу,  $\text{г} / \text{моль}$ .

**Глибинний показник корозії**  $K_{\text{п}}$  - глибина корозійного руйнування металу  $\Pi$  в одиницю часу  $\tau$  (наприклад,  $\text{мм} / \text{рік}$ ).

Глибина корозійного руйнування може бути середньою або максимальною. Глибинний показник корозії можна використовувати для характеристики рівномірної і нерівномірної корозії металів. Він зручний для порівняння швидкості корозії металів з різними швидкостями.

На основі глибинного показника швидкості корозії побудована десятибальна шкала корозійної стійкості металів (табл. 1 )

Група стійкості	Швидкість корозії, мм/рік	Бал
1. Абсолютно стійкі	<0,001	1
2. Вельми стійкі	0, 001- 0,005	2
	0,005- 0,01	3
3. Стійкі	0,01-0,05	4
	0,05-0,10	5
4. Знижено-стійкі	0,10-0,50	6
	0,5-1,0	7
5. Малостійкі	1,0-5,0	8
	5,0-10,0	9
6. Нестійкі	>10,0	10

**Таблиця 1 - Десятибальна шкала корозійної стійкості металів**

## Непрямі показники

Зміна електричного опору зразка металу за певний час випробувань  $\tau$  ( $KR$ )

$$KR = \frac{R_1 - R_0}{R_0}, \quad (8)$$

де  $R_0$  і  $R_1$  - електричний опір зразка відповідно до і після корозії.

При вимірюванні опору площа поперечного перерізу металевого зразка повинна бути однаковою протягом усього циклу випробувань. Ця умова не завжди виконується, тому часто визначають Зміна питомого опору - це зміна опору на одиницю площі поперечного перерізу зразка ( $\text{см}^2$ ,  $\text{мм}^2$ ) довжиною, що дорівнює одній одиниці ( $\text{см}$ ,  $\text{м}$ ). Визначення змін електричного опору (або питомого опору) має обмежене застосування. Для металевих листів цей спосіб застосовний, коли товщина листа не перевищує 3 мм. Найбільш достовірні дані отримані за зразками дроту. Цей метод фактично не підходить для зварних зразків.

**Механічний показник корозії  $K_m$**  – зміна будь-якого показника механічних властивостей металу за час корозії  $\tau$ .

Порівняно часто користуються зміною межі міцності.

Міцнісний показник  $K_{\sigma}$  за час  $\tau$  виражається формулою

$$K_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma_B}{\sigma_{B0}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де  $\Delta\sigma_B$  - зміна межі міцності на розрив після корозії зразка протягом часу  $\tau$  ;

$\sigma_U$  - межа міцності при розтягуванні зразка до корозії.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

## ХІМІЧНИЙ МЕХАНІЗМ КОРРОЗІИ ТА ОКИСЛЕННЯ МЕТАЛІВ

Хімічна корозія - мимовільна взаємодія металу з корозійним середовищем, при якій одночасно відбувається окислення металу і відновлення окислених компонентів корозійного середовища. Хімічна корозія поділяється на два види залежно від умов процесу: 1) Газ; 2) Неелектролітична корозія. 1 Газова корозія - корозія металу, викликана дією пари та газів, як правило, при високих температурах, коли волога на поверхні металу не може конденсуватися. 2 Неелектролітична корозія - корозія металів у непровідних рідинах. Корозія може відбуватися через хімічні механізми та в розчинах електролітів. Такі справи були порушені, зокрема, Ю.М. Колоткін і Г. М. Флорянович показали, що розчинення заліза, хрому та їх сплавів в 0,1 н розчині  $H_2SO_4$  не залежить від величини електродного потенціалу. Велика кількість металевих конструкцій пошкоджується внаслідок газової та неелектролітичної корозії.

Найбільш поширеним і практично важливим видом хімічної корозії металів є газова корозія. Вона має місце при роботі багатьох металевих деталей і апаратів. Особливо часто реактори, арматура печей, деталі двигунів внутрішнього згоряння, вироби, одержувані з металів і сплавів методами лиття під тиском, піддаються впливу високих температур і таких газів, як кисень, сполуки хлору та сірки, оксиди азоту, сірководню.

Поведінка металів при високих температурах має велике практичне значення і може бути описана в термінах двох важливих властивостей - теплостійкості і термостійкості. Жаростійкість — здатність металу протистояти газовій корозії при високих температурах, жаростійкість — здатність металу зберігати високі механічні властивості при високих температурах. Метал може бути жаростійким, але не жароміцним, і навпаки, він може бути жароміцним, але не жаростійким. Наприклад, алюмінієві

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

сплави жаростійкі, але не жаростійкі при температурах 400-4500°C. Швидкорізальна вольфрамова сталь 600-7000° жаростійка, але не жаростійка. Метали, що працюють при високих температурах, повинні поєднувати в собі гарну теплостійкість з високою жаростійкістю. У сплавах на основі ніхрому досягається високоефективне поєднання теплостійкості і жароміцності

## 2 ТЕРМОДИНАМІКА ГАЗОВОЇ КОРРОЗІИ МЕТАЛІВ

Зазвичай теорію хімічної корозії викладають на прикладі газової корозії. Найбільш поширеним процесом газової корозії є реакція окислення металу киснем. Припустимо, взаємодія металу з киснем (окислення металу) протікає по рівнянню



Константу рівноваги цієї реакції можна виразити через рівноважне значення активності  $a_{\text{O}_2}$  або рівноважне значення тиску кисню  $p_{\text{O}_2}$ , яке називають **пружністю дисоціації оксиду**:

$$K_{\text{равн}} = \frac{1}{a_{\text{O}_2}} = \frac{1}{p_{\text{O}_2}}. \quad (10)$$

При протіканні реакції (I) маси металу і кисню будуть спадати, а маса оксиду зростати.

Зміна вільної енергії Гіббса будь-якої реакції визначається формулою

$$\Delta G = \Sigma \Delta G_{\text{прод р.н.}} - \Sigma \Delta G_{\text{ісх.в.}} \quad (11)$$

Тому, використовуючи рівняння (11), слід врахувати, що вільна енергія речовини пропорційна числу його молей. Залежність величини вільної енергії речовини від кількості його молей визначається величиною хімічного потенціалу і виражається рівнянням

$$\mu = \mu^0 + RT \ln a, \quad (12)$$

де  $\mu^0$  - хімічний потенціал 1 молю при активності  $a = 1$ .  
З урахуванням рівнянь (11) і (12) для реакції ( I) можемо записати

$$\Delta G = \mu_{\text{MeO}_2} - \mu_{\text{Me}} - \mu_{\text{O}_2} = \mu^0_{\text{MeO}_2} + RT \ln a_{\text{MeO}_2} - \mu^0_{\text{Me}} - RT \ln a_{\text{Me}} - \mu^0_{\text{O}_2} - RT \ln a_{\text{O}_2}. \quad (13)$$

Для даної реакції  $\mu^0_{\text{MeO}_2} - \mu^0_{\text{Me}} - \mu^0_{\text{O}_2}$  є не що інше, як стандартне зміна вільної енергії Гіббса  $\Delta G^0$ , яке пов'язане з константою рівноваги реакції рівнянням:

$$\Delta G^0 = -RT \ln K_{\text{равн}}. \quad (14)$$

З огляду на рівність ( 14) і те, що активність твердої фази (Металу і оксиду) прийнято вважати рівною одиниці, отримуємо рівняння (13 ) в наступному вигляді:

$$\Delta G = -RT \ln K_{\text{равн}} - RT \ln a_{\text{O}_2}.$$

Використовуючи рівняння ( 10) і виражаючи зміну вільної енергії Гіббса через величини рівноважного і парціального тиску кисню, остаточно отримуємо

$$\Delta G = -RT \ln \frac{1}{p'_{\text{O}_2}} - RT \ln p_{\text{O}_2} = -RT \ln \frac{p_{\text{O}_2}}{p'_{\text{O}_2}} \quad (15)$$

Рівняння ( 15) дозволяє оцінити можливість протікання процесу окислення металу киснем. Якщо  $p_{\text{O}_2} > p'_{\text{O}_2}$ , то  $\Delta G < 0$ , значить, процес окислення можливий. Якщо  $p_{\text{O}_2} < p'_{\text{O}_2}$ , то окислення неможливо, так як при цьому  $\Delta G > 0$ .

**Еластичність** дисоціації (або рівноважний тиск кисню) **оксиду  $p'_{\text{O}_2}$**  зростає з підвищенням температури. Тому, **хоча** підвищення температури прискорює хімічну реакцію окислення, термодинамічна ймовірність цього процесу зменшується. **Тому в нормальній атмосфері з парціальним тиском кисню близько 20 кПа срібло стає неокислюваним металом при температурі 400 К. Те ж саме відбувається з міддю при температурах вище 2000 К. Якщо знизити парціальний тиск кисню або використовувати атмосферу, бідну на кисень, такі метали, як залізо, нікель і цинк, не окислюватимуться.**

#### ОКСИДНІ ПЛІВКИ НА МЕТАЛАХ

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24



При взаємодії металу з киснем продуктами корозії є оксидні плівки різної товщини, від властивостей яких залежить подальший процес корозії.

Оксидна плівка як утворилась, може захистити метал від подальшого окислення. Плівка продуктів корозії захищатиме метал від подальшої корозії при наступних умовах :

- 1) суцільність плівки;
- 2) коефіцієнт теплопровідності плівки повинен бути близький до коефіцієнту теплопровідності металу;
- 3) плівка повинна мати гарну адгезію, тобто хороше зчеплення з металом;
- 4) плівка повинна бути стійкою в газовому середовищі;
- 5) відповідність кристалічної решітки плівки і металу.

Товщина утворених плівок залежить від властивостей металу, середовища та інших факторів. Залежно від товщини плівки на металах прийнято поділяти на:

- а) тонкі (невидимі) товщиною від мономолекулярного шару до 40 нм;
- б) середні (видимі як кольори мінливості), що мають товщину 40-50 нм;
- в) товсті (видимі) товщиною більше 500 нм. При вивченні газової корозії необхідно

визначити не тільки зміни структури утвореної плівки, а й характер зміни товщини плівки в часі. Для вимірювання товщини, структури і властивостей оксидних плівок використовуються різні

сучасні методи, включаючи інтерферометрію, електронну мікроскопію, радіографію і електрофотографія. Оксидні плівки можуть бути суцільними і розривними. Пілінг

і Бедворт сформулювали умови, за яких утворюється суцільна плівка, як а може запобігти подальшому окисленню металу.

Умовами безперервності є: Молекулярний об'єм оксиду  $V_{ок}$  має бути більшим, ніж об'єм металу  $V_{Me}$ , витраченого на утворення молекули оксиду.

В іншому випадку оксиду буде недостатньо.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

Покрийте метал суцільним

шаром.

Тому при створенні горбка утворюється суцільна плівка.

$$\frac{V_{ок}}{V_{Me}} > 1.$$

Якщо  $\frac{V_{ок}}{V_{Me}} < 1,$

то плівка не виходить суцільною.

Так на кальції утворюється пориста плівка, так як  $V_{CaO} / V_{Ca} = 0,63$ , а на алюмінії - суцільна ( $V_{Al_2O_3} / V_{Al} = 1,31$ ). У реальних умовах, коли  $V_{ок} / V_{Me} \gg 1$ , може відбуватися таке зростання внутрішніх напруг, яке призводить до здуття і відшарування плівки, що обумовлює зниження її захисних властивостей. Так вольфрам, має  $V_{ок} / V_{Me} = 3,36$ , утворює оксидні пінки зі слабкими захисними властивостями. Оптимальне співвідношення  $V_{ок} / V_{Me}$  має бути в певних межах:  $2,5 > V_{ок} / V_{Me} > 1$ .

### КІНЕТИКА ГАЗОВОЇ КОРОЗІЇ

Термодинамічних даних недостатньо для оцінки фактичної поведінки металів в умовах окиснення. Потрібні конкретні дані про швидкість процесу та вплив на процес різних внутрішніх і зовнішніх факторів. Швидкість газової корозії залежить від типу металу і складу сплаву, природи газового середовища, температури, особливостей утворюваних продуктів корозії і часу витримки.

Швидкість газової корозії  $V_{газ}$  зазвичай виражається як швидкість росту оксидної плівки наступним чином:

$$V_{газ} = \frac{dx}{d\tau}$$

Розглянемо умови зростання плівки при кінетичному і дифузійному контролі .

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		25

## *1 Кінетика утворення пористої оксидної плівки*

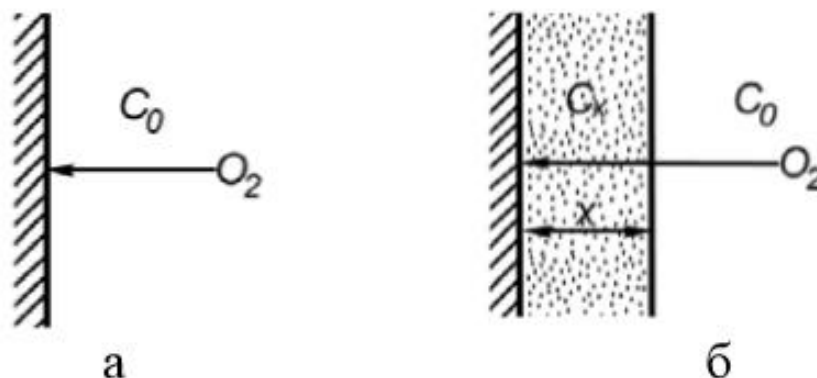
Безпосередня взаємодія кисню з поверхнею металу можливо не тільки при повній відсутності плівки, але і при дуже тонкій або пористій (несуцільній) плівці (рис. 2 а).

Процес газової корозії в цьому випадку складається з наступних стадій:  
а) транспортування O<sub>2</sub> (в загальному випадку газоподібної речовини) до поверхні металу;

б) адсорбція газу на поверхні металу;

в) хімічна взаємодія;

г) відведення продуктів, що утворюються.



**Малюнок 2 - Схема взаємодії кисню з металом: а – при тонкій або пористій плівці; б - при суцільній плівці**

Відповідно до закону дії мас швидкість корозії пропорційна концентрації кисню C<sub>0</sub>:

$$\frac{dx}{d\tau} = k_p \cdot C_0, \quad (16)$$

де k<sub>p</sub> - константа швидкості реакції.

Після розділення змінних і інтегрування отримуємо

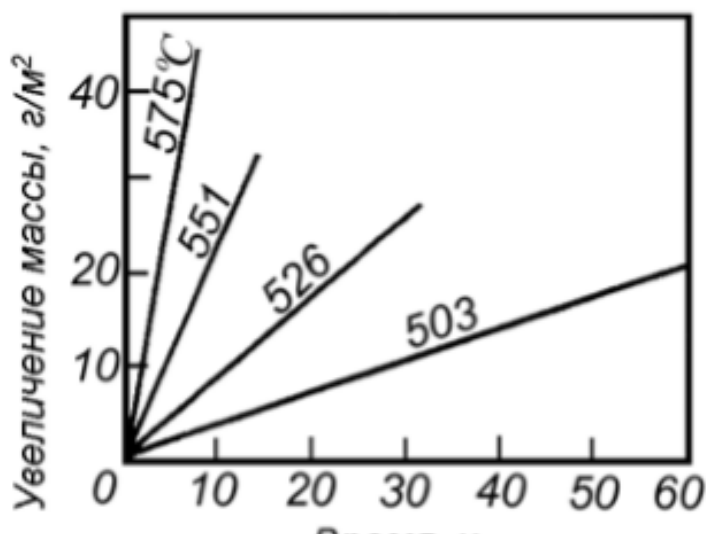
$$x = k' \tau + A.$$

У цьому рівнянні k' = k<sub>p</sub> · C<sub>0</sub> - величина постійна для даної концентрації кисню. Фізичний сенс постійної інтегрування А полягає в тому, що окислення починається на металі, вже покритому тонкою оксидною

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата		26

плівкою. Вважаючи величину  $A$  близькою до нуля, остаточно записуємо рівняння лінійного росту оксидної плівки

$$x = k' \cdot \tau. \quad (17)$$



*Малюнок 3 - Корозія магнію в середовищі кисню при різних температурах*

Лінійний закон окислення характерний для лужних і лужноземельних металів (рис. 3), коли утворюються несуцільні плівки.

### 2 Кінетика утворення суцільної оксидної плівки

Якщо плівка суцільна, то **проникнення кисню в метал пригнічується** (рис. 2б). При формуванні суцільної плівки процес газової корозії складається з наступних етапів:

- а) Стадія, на якій метал переходить у оксидний шар у вигляді іонів і електронів.
- б) Транспорт іонів металу та електронів у шарі оксиду.
- в) Стадія міграції кисню до межі розділу оксидної плівки та газової фази.
- г) Адсорбція кисню на поверхні оксидної плівки.
- д) Іонізація кисню, адсорбованого на поверхні оксиду.
- д) Транспорт іонізованого кисню через оксидну мембрану.
- є) Стадії хімічної взаємодії.

В даному випадку, скориставшись рівнянням Фіка ( 1), можна записати

$$D \frac{dx}{dt} = K D S \frac{dx}{dx}$$

При коефіцієнті дифузії КД, приймаючи переріз, через яке йде дифузія, рівним одиниці ( S = 1) і виражаючи градієнт концентрації через

$$\frac{C_0 - C_x}{x},$$

де  $C_x$  - концентрація кисню у поверхні металу, а  $x$  – товщина плівки, знаходимо

$$\frac{dx}{d\tau} = KD \frac{C_0 - C_x}{x}. \quad (18)$$

Якщо дифузія - фактор, що лімітує, то весь кисень, який досяг металу, встигає вступити в реакцію і  $C_x \rightarrow 0$ . Тоді мають місце граничні умови дифузії

$$\frac{dx}{d\tau} = KD \frac{C_0}{x}.$$

Остаточно після поділу змінних і інтегрування отримуємо рівняння параболічного росту оксидної плівки

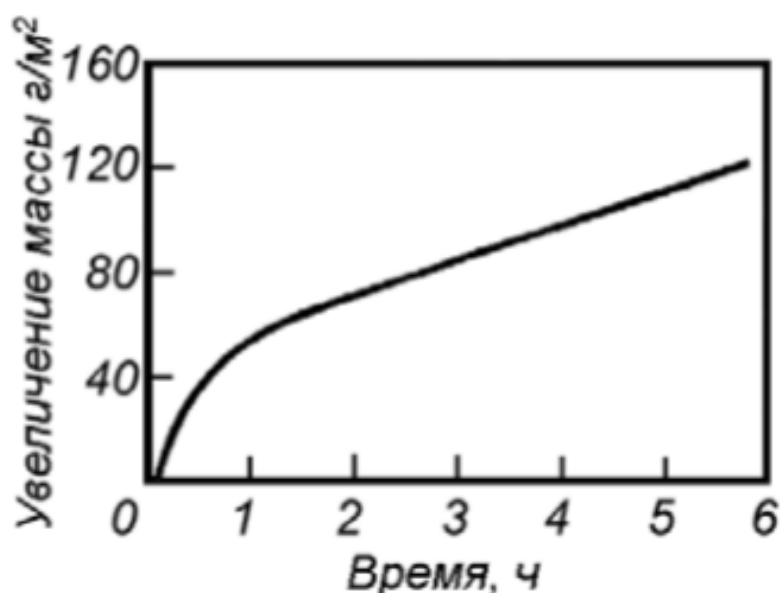
$$x^2 = K'' \cdot \tau. \quad (19)$$

У цьому рівнянні  $k'' = 2KD C^2$ .

Більшість металів, які використовуються в техніці, окислюються переважно за параболічним законом (рис.

4). Ріст плівки часто відбувається повільніше, ніж передбачає параболічний закон. У таких випадках ослаблення процесу корозії пояснюється ущільненням мембрани або появою дефектів у вигляді бульбашок або розшарувань, які перешкоджають дифузії. У таких випадках зростання плівки відбувається за логарифмічним законом.

$$x = \ln(k \cdot \tau). \quad (20)$$



**Малюнок 4 - Окислення міді на повітрі при 800°C**

Різні метали по-різному окислюються в різних діапазонах температур. Для натрію, кальцію і магнію характерні лінійні закони окиснення. Парабола - для міді, заліза та нікелю. Логарифмічний - для алюмінію, цинку і хрому.

Мідь окислюється за законом логарифмів при температурі до 100°C, тантал – до 150°C, нікель – до 650°C, залізо – до 400°C. З підвищенням температури закони окиснення можуть змінюватися. Отже, за законом параболи залізо окислюється в інтервалі 500-1100°C, а мідь в інтервалі 300-1000°C.

#### МЕХАНІЗМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОКИСЛЕННЯ

Утворення оксиду може відбуватися:

- а) на поверхні металу;
- б) всередині оксидної плівки;
- в) на поверхні оксидної плівки.

Перший випадок має місце, якщо швидкість дифузії кисню велика.

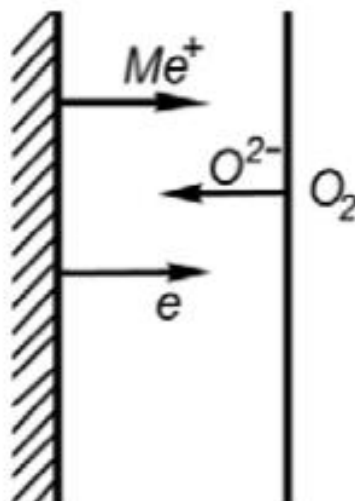
Коли швидкість дифузії іонів і атомів металу стає домінуючою, на поверхні оксидної плівки утворюються оксиди. У більшості випадків швидкості дифузії кисню і металу порівнянні, а зона росту оксидної піни розташована зсередини і трохи ближче до зовнішньої.

Радіус іона металу набагато менший, ніж радіус іона кисню, тому швидкість дифузії першого трохи вища.

Механізм газової корозії пояснюється іонно-електронною теорією Вагнера. Відповідно до цієї теорії в окисній плівці відбувається взаємодифузія іонів

						КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			29

металу і кисню. У той же час металева поверхня є анодною і на ній протікає реакція іонізації атомів металу. Утворилися позитивні іони металу і звільнені електрони переміщуються в плівці роздільно (рис. 5). Електрони переміщуються з великою швидкістю; дифузія ж іонів металу протікає в результаті переміщення або за дефектними місцями кристалічної решітки оксиду, або по її Міжвузля.



**Малюнок 5** - Схема іонноелектронного механізму високотемпературного окислення

Молекули кисню, адсорбовані з газової фази, дисоціюють на зовнішній поверхні оксиду. Атоми кисню, які отримують електрони, перенесені з поверхні металу, перетворюються на іони  $O^{2-}$  і починають дифундувати до іонів металу. На зовнішній поверхні оксидної плівки,

Атом кисню приймає електрони і діє як катод.

Це призводить до взаємодифузії іонів металу та іонів кисню всередині шару оксиду, що призводить до утворення оксиду.

1. Теорія зменшення дефектності утворюється окалини.
2. Теорія освіти захисного оксиду легуючого елемента.
3. Теорія освіти високозащитних подвійних оксидів.

Відповідно до теорії зменшення дефектності утворюється окалини (Вагнер, Хауффе і ін.) необхідно прагнути до того, щоб в оксидній плівки,, утвореної атомами основного металу, була мала концентрація дефектів, бо дифузія в оксиді протікає по дефектних місцях. Зменшення кількості дефектів можливо, якщо атоми легуючого елемента мають іншу валентність, ніж атоми основного металу. При цьому , якщо утворюються оксиди з надлишком атомів металу

(Наприклад, ZnO), легування доцільно здійснювати металом, маючим велику валентність; в разі утворення оксидів з недоліком атомів металу (наприклад, NiO) легують металом, мають меншу валентність. Оксид легуючого елемента повинен бути розчинний в оксиді основного металу. А.А.Смирнов і Н.Д.Томашов виходять з необхідності створення на поверхні оксиду легуючого елемента, здатного захистити основний метал від окислення. Теорія утворення захисних оксидів

Включає такі вимоги до легуючих елементів:

1 Оксиди легуючих елементів повинні бути суцільними. Необхідно виконати умови продовження.

Оксиди двох легуючих елементів повинні мати високий електричний опір, щоб запобігти взаємній дифузії іонів металів, електронів та іонів кисню. Найбільший електричний опір мають оксиди алюмінію і кремнію. 3 Радіус атомів легуючого елемента повинен

бути меншим за радіус атомів основного металу. Це необхідно з двох причин. Поперше, чим менший атом, тим легше йому дифундувати в поверхню метал у. По-друге, постійна решітки оксиду легуючого елемента меншого радіуса така, що дифузія атомів основного елемента через цей оксид дуже утруднена.

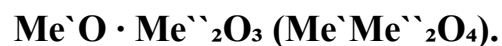
Теплота утворення оксиду легуючого елемента повинна бути більшою за теплоту утворення оксиду основного металу. Отже, теплота утворення оксиду алюмінію становить 1678 кДж/моль, а теплота утворення оксиду заліза

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		31



(FeO) — 272 кДж/моль. 5 Оксиди легуючих елементів повинні мати високі температури плавлення та сублімації і не повинні утворювати евтектики з низькою температурою плавлення при змішуванні з іншими оксидами. 6 Легуючі елементи повинні мати таке співвідношення легування, щоб утворювати твердий розчин з основним металом, який необхідний для рівномірного розподілу в металі та утворення оксидів. Утворює плівку по всій поверхні сплаву.

Відповідно до теорії утворення високозахисних подвійних оксидів (П.Д. Данков, В.І. Архаров, І.І. Коріння-лов, Гульбрансен і ін.), найповніше сформульованою В.І. Архарова для сплавів на залізній основі, підвищення жаростійкості досягається в тому випадку, якщо легуючий елемент утворює з основним металом подвійні оксиди типу шпінелі

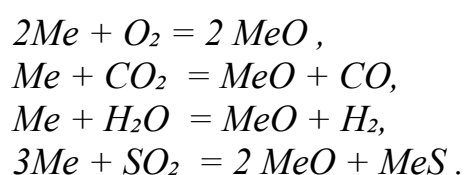


Ці оксиди мають значно вищу захисну здатність, ніж оксиди окремих металів. Відповідно до цієї теорії, легуючі елементи призначені для запобігання утворенню фази вюститу (FeO) на поверхні сплавів на основі заліза, яка є найбільш проникною для дифузії іонів заліза. Оксиди FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub> мають високі захисні властивості.

Три теорії жароміцних сплавів, коротко наведені вище, не суперечать одна одній, а скоріше доповнюють і розвивають одна одну, дозволяючи не тільки теоретично перевірити існуючі сплави, але й створювати нові жароміцні сплави. Це можна зробити більш раціонально.

### ДЕЯКІ ВИДИ ГАЗОВОЇ КОРРОЗИИ

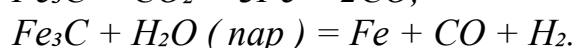
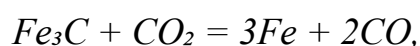
Метали при високих температурах можуть окислюватися киснем, парами води, оксидом вуглецю (IV), оксидом сірки (IV):



					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

Навіть у машинобудуванні пристрої із заліза, сталі та чавуну часто піддаються впливу атмосферних температур і таких газів, як кисень, водень і сполук, що містять сірку та вуглець. Крім окислення при температурах вище 700°C, кисень, водяна пара, оксид вуглецю (IV) та інші кисневмісні речовини здатні також знеуглецювати сталь і чавун. Знеуглецювання (декарбюризація)

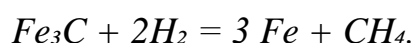
**Проводиться за схемою.**  $Fe_3C + \frac{1}{2} O_2 = 3 Fe + CO,$



На поверхні сталі відбувається окислення вуглецю. Вуглець дифундує з сусідніх шарів на поверхню сталі і окислюється. Це відбувається, коли концентрація вуглецю в поверхневому шарі сталі зменшується. Це викликає зміни в структурі сплаву та погіршує механічні властивості, особливо межі втоми та міцності на розрив.

При високих температурах і тисках сталь, мідь та її сплави та інші метали руйнуються воднем. Цей процес руйнування називається водневою корозією. Воднева корозія визначається здатністю водню адсорбувати, дифундувати та розчинятися всередині металу. Розчинений водень декарбонізує сталь.

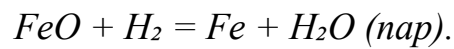
Ukrainian ▼



Утворений метан не виділяється з металу, а накопичується на кордоні зерен, і в результаті виникнення високого тиску відбувається внутрішньокристалітне розтріскування. Обезуглеводнення сталі залежить від температури, тиску водню і часу дотику з ним виробу.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

Розчинений в залозі водень реагує з оксидами, відновлюючи їх:

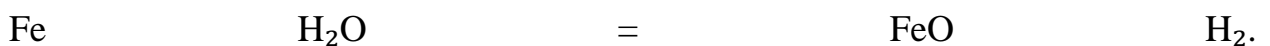


Водяна пара, що утворюється, послаблює зв'язки між кристалітами, викликаючи крихкість металу, підвищення внутрішнього тиску та подальше розтріскування.

Проникнення водню в сталь, або наводнювання, відбувається тільки тоді, коли атоми водню адсорбуються на поверхні сталі. Тільки атоми водню можуть проникати глибоко в сталь. При кімнатній температурі молекули водню не дисоціюють, тому наводнювання сталі не відбувається. При високих температурах атмосфера молекулярного водню досягає рівноваги з адсорбованими атомами водню, які утворюються на поверхні сталі, а потім проникають всередину сталі. З підвищенням парціального тиску молекулярного водню зростає концентрація адсорбованого водню і, як наслідок, спостерігається наводнювання сталі.

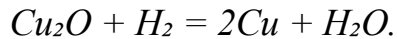
$$C_H = k\sqrt{p},$$

Тут  $C_H$  – концентрація водню в сталі.  $p$  – парціальний тиск молекулярного водню.  $k$  – коефіцієнт пропорційності; Наводнювання сталі може відбуватися при високих температурах під час плавлення, зварювання, термічної обробки.



При високих температурах титан взаємодіє з водою з утворенням водню, який є джерелом гідрогенізації. Мідь і її сплави також схильні до водневої корозії або так званої водневої крихкості. При температурі вище 400°C які містяться в міді і розподілені по межах зерен включення оксиду міді (I) при взаємодії з воднем відновлюються:

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

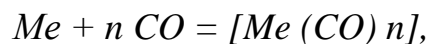


Водяна пара, що утворюється, розриває зв'язки між кристалітами, і в металі з'являються тріщини. Якщо мідь містить понад 0,01%  $\text{Cu}_2\text{O}$ , вона стає крихкою («воднева хвороба») і не використовується для виробництва пристроїв, які працюють при високих температурах і тиску.

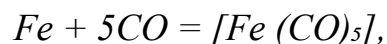
Водень розчинний у більшості перехідних металів (d-елементи), а s-елементи утворюють з воднем гідриди солей і легко розкладаються водою.

Наводнювання металів значно знижує пластичність і тривалу міцність.

Одним з видів газової корозії є **карбонільна корозія**, під якою розуміють руйнування металів і сплавів при впливі на них в особливих умовах оксиду вуглецю (II). Вона має місце при отриманні синтетичних спиртів (метилового, бутилового і ін.) при високому тиску і підвищених температурах. В цих умовах виходять легко возгоняючі з'єднання - карбоніли:



які потім розкладаються на метал і CO. Так, залізо починає реагувати з оксидом вуглецю (II) при температурі понад 120°C з утворенням пентакарбоніла заліза:



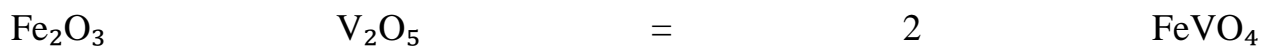
а нікель - при 200°C з утворенням тетракарбонілу нікелю  $[\text{Ni} (\text{CO})_4]$ .

Руйнування металу відбувається при розпаді карбоніла на метал і оксид вуглецю (II). Розкладання пентакарбоніла заліза супроводжується збільшенням об'єму в 5 разів. При дії CO кородує поверхневий шар металу, відбувається його розпушення на глибину до 5 мм. Зміна структури металу на деякій відстані від поверхні не відбувається. Карбонільні корозії не схильні до високолеговані хромисті і хромонікелеві сталі, марганцевисті бронзи

									лист
									лист
									35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

КМ 05:00:00:00 ПЗ

Якщо газоподібне середовище є продуктом згоряння ванадієвмісного палива, то в цьому випадку відбувається ванадієва корозія. При спалюванні такого палива, наприклад гасу, утворюється велика кількість палива. Кількість золи, що містить ванадій(V) оксид. Зола, що містить  $V_2O_5$ , прилипає до поверхні сталевих деталей і збільшує швидкість корозії. Причиною корозії ванадію є здатність  $V_2O_5$  розчиняти оксидну плівку на залізі й утворювати ванадат.



а залізо окислюється



Отриманий ванадій(III) оксид окислюють киснем повітря до ванадій(V) оксиду.

$V_2O_3 + O_2 = V_2O_5$ . Тому  $V_2O_5$ , який бере участь у процесі окислення металу, майже не витрачається на добування оксидів. Оксид ванадію

(V) також руйнує оксид нікелю та оксид хрому. руйнування захисної плівки,

$V_2O_5$  утворює

в ньому пори, дозволяючи газоподібному кисню та рідкому  $V_2O_5$ , який окислює метал, відносно легко проникати.

Корозію, викликану сполуками сірки, також

можна класифікувати як інший тип газової

корозії. При обробці сірковмісних нафт високими температурами в процесах крекінгу утворюються сірковмісні газоподібні продукти. При нагріванні руйнує чавун, сталь,

чавун і кольорові метали, особливо в

присутності водяної пари. Гази, що містять  $\text{SO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$ ,

Вуглецева сталь -  $300^\circ\text{C}$ , мідь інтенсивно руйнується при кімнатній температурі. Нікель кородує в присутності цих газів при температурі  $300^\circ\text{C}$ . Хром стійкий до сірчаного газу завдяки утворенню на його поверхні сульфиду хрому  $\text{Cr}_2\text{S}_3$ , який має захисні властивості. Тому хромисті сталі з підвищеним вмістом хрому (більше 12%) більш стійкі, ніж хромонікелеві. Сталі з високим вмістом хрому особливо довговічні. Алюміній стійкий до впливу сірководню до  $500^\circ\text{C}$ .

Підвищити стійкість хромистих сталей, що містять 20-30% (мас.) Cr, до впливу газів і температури до  $1000^\circ$  можна введенням в їх склад 4-5% (мас.) алюмінію.

І ще один вид газової корозії - **корозія газоподібним хлором і хлористим воднем.**

При високих температурах всі метали руйнуються під дією сухого хлору і хлороводню  $\text{HCl}$  (табл. 3).

Таблиця 3 – Верхні допустимі температури застосування металів і сплавів в сухому хлорі і хлороводню

Матеріал	Т, $^\circ\text{C}$ , в атмосфері	
	хлора	Хлороводород а
Алюміній	100	150
Медь	100	120
Нікель	550	600
Углеродистая сталь Ст.3	150	350
Нержавеющая сталь	300	500

**Найстабільніші матеріали в гарячій атмосфері хлору та хлористого водню — це нікель та його сплави, а також нержавіюча сталь.**

**Це пояснюється тим, що завдяки низькому тиску насиченої пари продукти корозії, головним чином хлорид нікелю і хлорид хрому, мають захисні властивості.**

## МЕТОДИ ЗАХИСТУ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ ВІД ГАЗОВОЇ

										ЛЧЕТ
										38
Изм.	ЛЧЕТ	№ док.ум.	Подпись	Дата						

КМ 05.00.00.00 ПЗ

## КОРРОЗИИ

Для захисту від газової корозії використовують різні методи.

Основними з них є:

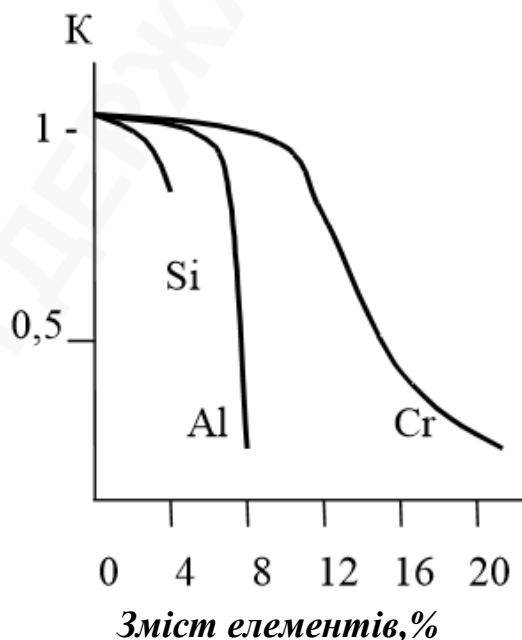
- а) жаростійке легування;
- б) захисні покриття;
- в) створення захисних атмосфер.

1 Найбільш ефективним способом запобігання окисленню при високих температурах є термолегування, тобто введення до складу сплаву компонентів, що підвищують жароміцність. До цих компонентів в першу чергу відносяться хром, алюміній і кремній. Ці елементи легше окислюються на повітрі, ніж леговані метали, і утворюють хорошу захисну плівку. Хром, алюміній і кремній використовуються для легування звичайних залізовуглецевих, нікелевих та інших сплавів. Хром, алюміній, кремній (довідка) Боягузливий. б) Істотно уповільнює окислення сталі, що пов'язано з утворенням плівки з високими захисними властивостями. Сталі з приблизно 30% Cr, до 10% Al і до 5% Si мають високу жароміцність. Однак, на відміну від мартенситних і напівферритних сталей з низьким вмістом хрому, сталі з високим вмістом хрому є феритними і важко піддаються термічній обробці, а сталі з високим вмістом алюмінію і кремнію технічно не вигідні, крихкі і дуже тверді, що ускладнює обробку. Тому ці сплави не знайшли широкого застосування. Основою жароміцних сплавів сталі є хром, але для подальшого підвищення жаростійкості додають елементи кремній або алюміній або обидва в кількості до 4-5%. Наприклад, сплавлення заліза 3,5% Al достатньо, щоб зменшити швидкість газової корозії заліза в 2 рази при 900°C, а приблизно 5,5% Al достатньо, щоб зменшити її в 4 рази. При легуванні сталі титаном, міддю, кобальтом і берилієм

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		39

підвищення жароміцності значно менше. Елементи, що утворюють легкоплавкі або летючі оксиди, такі як ванадій, молібден і вольфрам, прискорюють процес окислення сталі. Швидкість окислення міді знижується при сплаві її алюмінієм, берилієм, оловом і цинком.

2 Як захисні покриття фактично використовуються металеві та неметалічні покриття. Серед металевих покриттів для цих застосувань в основному використовуються термодифузійні покриття з алюмінієм (термоплакування), хромом (термохромування) і кремнієм (силифікація). В якості неметалічного покриття використовується термостійка емаль.



**Малюнок 6 - Вплив легуючих елементів на відносну швидкість газової корозії сталі**

Термодифузійні покриття утворюються шляхом дифузії з твердої фази алюмінію і хрому. Перетворює кремній на неблагородні метали, такі як сталь.

Процес відбувається при високих температурах, у вакуумі, в нейтральному або відновному середовищі та в атмосфері газоподібного хлору. Продукт вводиться в нанесений елементний порошок або порошкоподібну суміш цього металу і піддається піролізу при температурі нижче температури дифузії або вводиться в розплав.



Необхідною умовою дифузії є порушення структури металевої решітки основного металу. При високій температурі, яка наближається до температури плавлення, рухливість металевих іонів настільки велика, що відбувається обмін металів. Товщина покриття визначається температурою і часом проведення процесу.

В результаті дифузії в поверхневому шарі сталі утворюються сплави оксидів  $Al_2O_3$ ,  $Cr_2O_3$ ,  $SiO_2$  або подвійних сплавів  $FeAl_2O_4$ ,  $FeCr_2O_4$ ,  $Fe_2SiO_4$ , що володіють підвищеними захисними властивостями і обумовлюють значну жаростійкість термодифузійних покриттів.

Алітування сталевих виробів здійснюють в зібраному вигляді, так як утворюється при цьому захисний шар крихкий і не допускає механічної обробки (за винятком зварювання).

Деталі, очищені від окалини, іржі і бруду завантажують в герметичний ящик який закривається (реактор), ретельно засипають реакційною сумішшю, що складається з алюмінієвого порошку (або ферроалюмінію) - 50%, оксиду алюмінію - 45-48% і нашатирю ( $NH_4Cl$ ) - 2-5%. Нагрівати при температурі 950-1000<sup>0</sup>C 3-4 години.

Оксид алюмінію необхідний для запобігання спікання металевих порошків. Нашатир створює захисну неокислювальну атмосферу всередині реактора. При нагріванні він розкладається на аміак і хлористий водень, витісняючи повітря з реактора.

Алюмінієва пудра повинна бути дуже дрібною, щоб вона могла проникати в усі ділянки поверхні сталі, що обробляється. Вироби зі сталі, чавуну, міді піддаються процесу алізації. Феросплави стійкі в парах сірки і сірководневих газах і застосовуються для захисту від окислення котельного обладнання, деталей газогенераторів, муфелів, арматури, сталевих прокату, поковок тощо. Дифузійне насичення сталі алюмінієм є одним з найбільш надійних методів захисту обладнання від окис

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ної дії кисню повітря при високих температурах. Термохромування проводиться в рідкому, газовому або твердому (порошок) середовищі при температурах від 1000 до 1150 °С протягом 20-25 годин. Найбільш поширений порошковий метод, при якому використовують порошки хрому або ферохрому і каоліну (тонкодисперсного аргіліту, що складається в основному з каолініту).

$Al_2Si_2O_5(OH)_4$  – для запобігання спіканню) та аміаку (для створення неокислюючої атмосфери). Поверхневий шар, утворений дифузією хрому в сталі, є твердим розчином Fe-Cr. Має високу термостійкість і твердість. Термохромування в газовій фазі здійснюється в парах хлористої солі.

**Силіфікація** відбувається в порошках (мелений кремній або феросиліцій, суміші шамоту і хлориду амонію) і в газовому середовищі (пара чотирьохлористого кремнію) при температурах 1000-1200 °С за 10-24 години. Залежно від температури та часу кремніювання глибина проникнення вивільненого кремнію змінюється. ( $4Fe + 3SiCl_4 = 3Si + 4FeCl_3$ ) різна і становить від 0,8 мм до 1,0 мм . Поверхня Силіційованих виробів тверда, зносостійка і добре захищає вуглецеву сталь, чавун від газової корозії. Жаростійкі емалі мають склоподібну масу, одержувану сплавом шихти (пісок, крейда, глина, польовий шпат і ін.) і плавнів (бура, сода , поташ, фтористі солі та ін.). Крім склоутворних речовин, в шихту вводять оксиди хрому, титану, цинку, підвищують жаростійкість, зчіплюваність з металом і надають емалі потрібне забарвлення. Найбільш жаростійкі емалі (так звані керамічні) витримують температуру 1100<sup>0</sup> , а в окремих випадках - до 1400<sup>0</sup>С Емалеву суспензію наносять на очищену поверхню виробів зануренням в розплав або пульверизацією зі спеціального пістолета, після чого обпалюють до спікання в полум'яної або муфельній печі при температурі 880-1050<sup>0</sup>С.

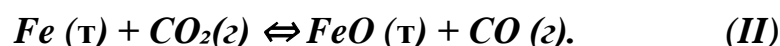
					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

До спеціальних термостійких покриттів , крім термодифузійного і жаростійких емалей, використовуваних для захисту від газової корозії, відносяться також металокерамічні покриття або кермети і металооксидних покриття, для отримання яких в якості неметалічних компонентів застосовують тугоплавкі оксиди, наприклад,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ , і з'єднання типу нітриду і карбідів. Металевими компонентами служать метали групи заліза, хром, вольфрам і молібден.

3 Створення захисних атмосфер є ефективним методом боротьби з газовою корозією. Захисна атмосфера виключає термодинамічну можливість протікання хімічної реакції взаємодії металів з компонентами газового середовища.

Для сталевих деталей захисною атмосферою є така , яка не викликає окислення, обезуглероднення, науглероднення і наводорожування. **Розрахунки** складу захисної атмосфери для конкретних металів і сплавів виконуються за константами рівноваги, встановленими для металевих газових систем.

При взаємодії заліза з оксидом вуглецю (IV) встановлюється рівновага



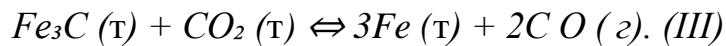
Константа рівноваги цієї реакції при температурі 900 °C дорівнює

$$K = p^2CO / p^2CO_2 = 2,2.$$

Звідси випливає, що при співвідношенні вихідних концентрацій  $p^2CO / p^2CO_2 > 2,2$  рівновагу в системі зміщується вліво і відбувається відновлення оксиду заліза (II), а не окислення заліза. При співвідношенні вихідних концентрацій  $CO$  і  $CO_2$   $p^2CO / p^2CO_2 < 2,2$  рівновага реакції зміщується вправо - відбувається окислення заліза.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

При взаємодії сталі з оксидом вуглецю (IV), крім реакції (II), може відбуватися також взаємодія карбіду заліза  $Fe_3C$  з  $CO_2$ :



Константа рівноваги реакції (III) при  $900^{\circ}C$   
 $K = p^{2CO} / p^{2CO_2} = 9,2.$

Звідки випливає, що при співвідношенні  $p^{2CO} / p^{2CO_2} < 9,2$  рівновага зміщується вправо - відбувається обезуглероднення сталі, а при співвідношенні  $p^{2CO} / p^{2CO_2} \gg 9,2$ , рівновага зміщується вліво - в сторону утворення  $Fe_3C$  (відбувається коксування).

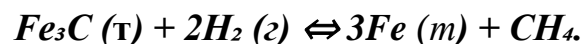
При взаємодії заліза з водою встановлюється рівновага



константа рівноваги цієї реакції при  $850^{\circ}C$  дорівнює  
 $K = p^{H_2} / p^{H_2O} = 2.$

Тому при даній температурі при співвідношенні  $p^{H_2} / p^{H_2O} > 2$  рівновагу зміщується вліво - окислення заліза не відбувається, а при  $p^{H_2} / p^{H_2O} < 2$  воно зміщується вправо - залізо окислюється.

В атмосфері водню між сталлю і газовим середовищем встановлюється рівновага



При температурі  $800^{\circ}C$  константа рівноваги цієї реакції дорівнює

$$K = p^{CH_4} / p^{2H_2} = 20,$$

звідки випливає, що при співвідношенні вихідних концентрацій  $p^{CH_4} / p^{2H_2} > 20$  рівновага зміщується вліво - відбувається коксування, а при  $p^{CH_4} / p^{2H_2} < 20$  воно зміщується вправо - відбувається обезуглероднення.

В даний час для створення захисних атмосфер в промисловості

застосовують суміші чотирьох типів:

					<b>КМ 05.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- а) водень - водяна пара - азот;
- б) водень - водяна пара - оксид вуглецю (II) - азот;
- в) оксид вуглецю (II) - оксид вуглецю (IV) - водень - водяна пара - азот;
- г) азот - оксид вуглецю (II) - водень.

В якості захисної атмосфери при термообробці і зварюванні застосовують інертні гази азот і аргон. Для ряду сплавів, наприклад, жароміцних на нікелевій основі і титані рекомендується виробляти нагрів в вакуумі, або в атмосфері очищеного аргону або гелію.

Склад атмосфери може сприяти полегшенню утворення на металах захисних плівок. На нержавіючих хромонікелевих сталях плівки з високими захисними властивостями виходять в атмосфері продуктів згоряння палива з надлишком повітря (коефіцієнт витрати  $\alpha > 1$ ). Окиснюваність магнію при температурах  $\sim 550^\circ\text{C}$  різко знижується в присутності оксидів вуглецю (IV) і сірки (IV). Присутність карбон (IV) оксиду та сульфур (IV) оксиду утворює захисну плівку з карбонату магнію та сульфату магнію.

## 6 Результати розрахунків

### 6.1 Отримання безрозмірних газодинамічних характеристик розрахунковим шляхом

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Безрозмірні газодинамічні характеристики були отримані шляхом розрахунку, вихідні дані для якого були отримані за допомогою FV: повний тиск на вході в щабель, повна температура на вході, статичний тиск на виході з щаблі, повний тиск на виході, статична і повна температури на виході з щаблі і масова витрата.

Постійними вихідними даними є наступні:

Модель розрахунку - Повністю стислива рідина.

Опорні величини: Температура - 288,15 К;

Тиск 98100 Па.

Рух області розрахунку - Обертання.

Частота обертів

Для типу кордону «Стінка» у всіх розрахунках були встановлені наступні типи граничних умов:

Температура	Тиск	ТурбЕнергія	ТурбДисипація
Нулевой поток	Вращающаяся стенка, логарифмический закон	Значение в ячейке рядом	Значение в ячейке рядом
—//—	—//—	—//—	—//—

## Результати розрахунку

Розрахунок проводився на сітці 29x29x29, без адаптації

$n = 51710 \text{ 1/s}$ ,  $u_2 = 130.665 \text{ m/s}$ ,  $\mu_2 = 0.3841$ ,  $Np/p = 1$   
 $p_{ni} = 0.0 \text{ Pa}$ ,  $p_{npi} = 423.2 \text{ Pa}$ ,  $t_{ni} = 0.0000 \text{ C}$ ,  $t_{npi} = 0.3708 \text{ C}$   
 $p_{ki} = 10932.4 \text{ C}$ ,  $p_{kpi} = 11283.9 \text{ C}$ ,  $t_{ki} = 11.8964 \text{ C}$ ,  $t_{kpi} = 12.1722 \text{ C}$

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

$m, \epsilon J/\delta M, H^* \rightarrow N, Bt$   $pk, \Uparrow a$   $pik$   $Tk, K$   $dT, K$   $di, -2/c2$   $pk-pn, \Uparrow a$   $KPDp$   $psip$   
 $F0$   
 1.068 23.39 12663 109032 1.111 299.9 11.90 11955.9 10932.4 0.7458 0.5220  
 0.0376  
 $cn, m/c$   $ck, m/c$   $pkp, \Uparrow a$   $pikp$   $Tkp, K$   $dTp, K$   $dip, -2/c2$   $dpp, \Uparrow a$   $KPDpp$   $psipp$   
 $F0p$   
 27.30 23.54 109384 1.110 300.2 11.80 11860.4 10860.7 0.7434 0.5164  
 0.0375

$n = 51710\check{y}/-\check{e}-, u2=130.665-\delta, \mu2=0.3841, Np/p=4$   
 $pni = 0.0Pa, pnpi = 759.2Pa, tni = 0.0000C, tnpi = 0.6597C$   
 $pki = 10988.0C, pkpi = 11559.3C, tki = 11.5486C, tkpi = 11.9957C$   
 $m, \epsilon J/\delta M, H^* \rightarrow N, Bt$   $pk, \Uparrow a$   $pik$   $Tk, K$   $dT, K$   $di, -2/c2$   $pk-pn, \Uparrow a$   $KPDp$   $psip$   
 $F0$   
 1.351 28.43 15393 109088 1.112 299.5 11.55 11606.3 10988.0 0.7715 0.5242  
 0.0476  
 $cn, m/c$   $ck, m/c$   $pkp, \Uparrow a$   $pikp$   $Tkp, K$   $dTp, K$   $dip, -2/c2$   $dpp, \Uparrow a$   $KPDpp$   $psipp$   
 $F0p$   
 36.41 29.98 109659 1.109 300.0 11.34 11392.7 10800.1 0.7669 0.5117  
 0.0474

$n = 51710\check{y}/-\check{e}-, u2=130.665-\delta, \mu2=0.3841, Np/p=7$   
 $pni = 0.0Pa, pnpi = 1349.1Pa, tni = 0.0000C, tnpi = 1.1844C$   
 $pki = 10728.3C, pkpi = 11597.7C, tki = 11.6271C, tkpi = 12.3086C$   
 $m, \epsilon J/\delta M, H^* \rightarrow N, Bt$   $pk, \Uparrow a$   $pik$   $Tk, K$   $dT, K$   $di, -2/c2$   $pk-pn, \Uparrow a$   $KPDp$   $psip$   
 $F0$   
 1.660 34.27 18555 108828 1.109 299.6 11.63 11685.2 10728.3 0.7492 0.5125  
 0.0585  
 $cn, m/c$   $ck, m/c$   $pkp, \Uparrow a$   $pikp$   $Tkp, K$   $dTp, K$   $dip, -2/c2$   $dpp, \Uparrow a$   $KPDpp$   $psipp$   
 $F0p$   
 48.79 37.01 109698 1.103 300.3 11.12 11179.8 10248.6 0.7375 0.4829  
 0.0580

$n = 51710\check{y}/-\check{e}-, u2=130.665-\delta, \mu2=0.3841, Np/p=10$   
 $pni = 0.0Pa, pnpi = 27004.7Pa, tni = 0.0000C, tnpi = 29.3260C$   
 $pki = 19909.1C, pkpi = 22821.4C, tki = 25.0645C, tkpi = 27.2539C$   
 $m, \epsilon J/\delta M, H^* \rightarrow N, Bt$   $pk, \Uparrow a$   $pik$   $Tk, K$   $dT, K$   $di, -2/c2$   $pk-pn, \Uparrow a$   $KPDp$   $psip$   
 $F0$   
 2.130 -8.19 -4436 118009 1.203 313.1 25.06 25189.8 19909.1 0.6326 0.3529  
 0.0751  
 $cn, m/c$   $ck, m/c$   $pkp, \Uparrow a$   $pikp$   $Tkp, K$   $dTp, K$   $dip, -2/c2$   $dpp, \Uparrow a$   $KPDpp$   $psipp$   
 $F0p$   
 242.79 66.34 120921 0.967 315.3 -2.07 -2082.5 -4183.3 0.6175 0.3444  
 0.0649

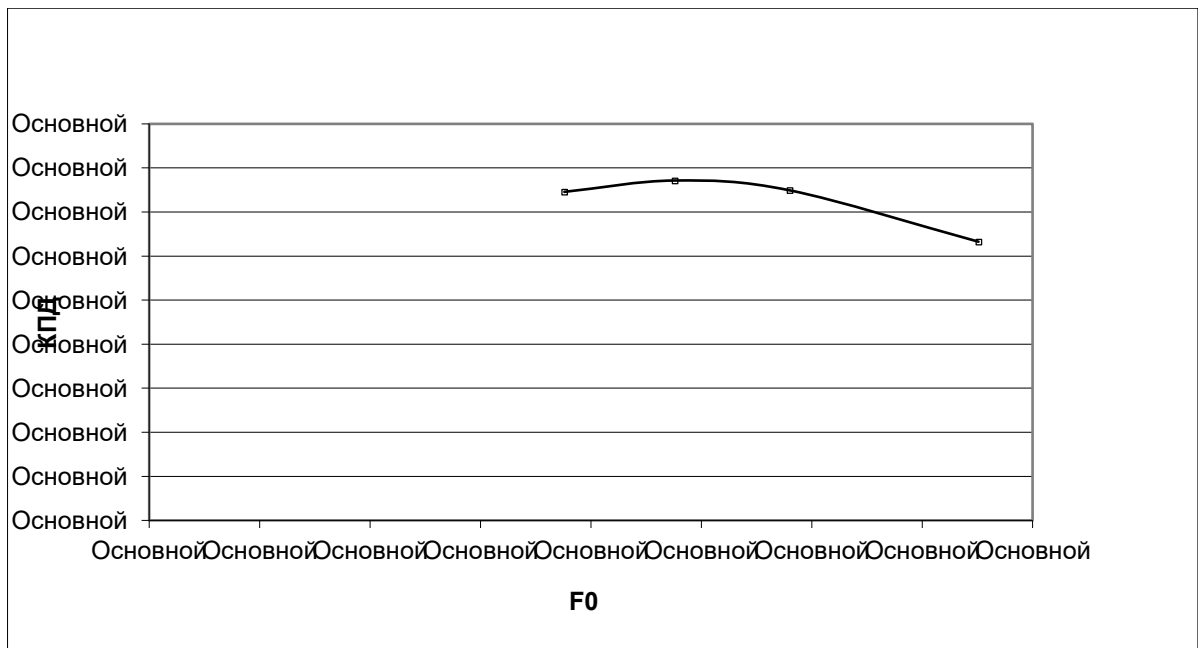


Рисунок 6.1 ККД ступеня по статичним параметрам

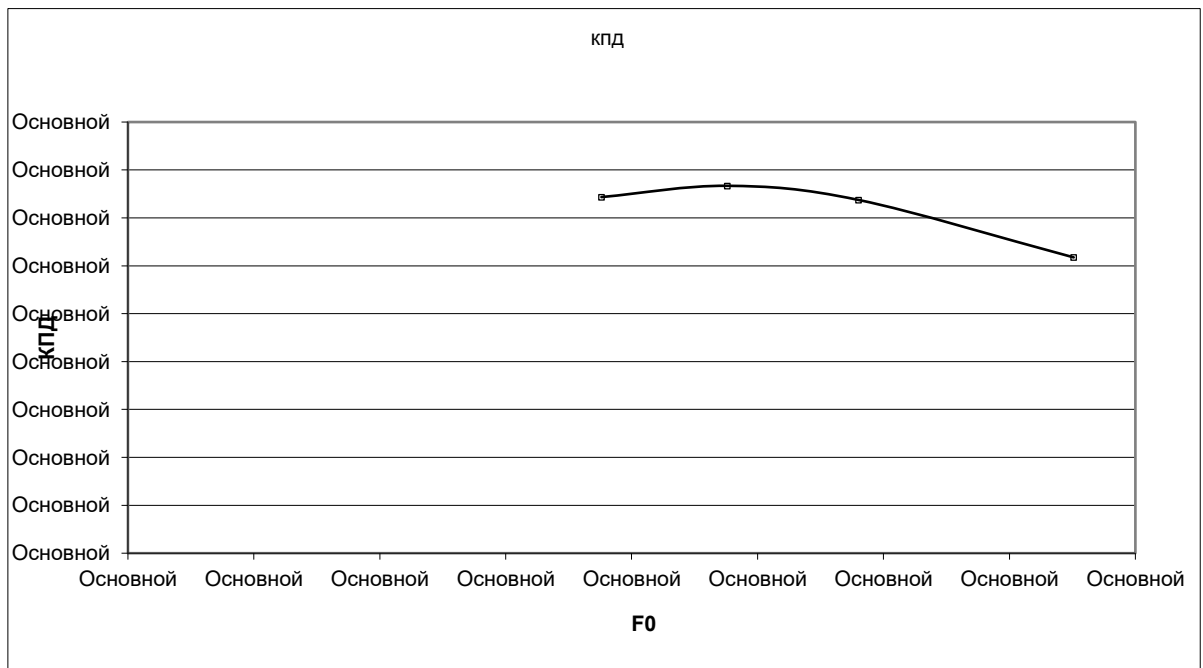


Рисунок 6.2 ККД ступеня по повним параметрам

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 05.00.00.00 ПЗ





## 6.2 Порівняння газодинамічних характеристик

Порівнюємо безрозмірні газодинамічні характеристики повітрорудвки отримані експериментальний і розрахунковим методом.

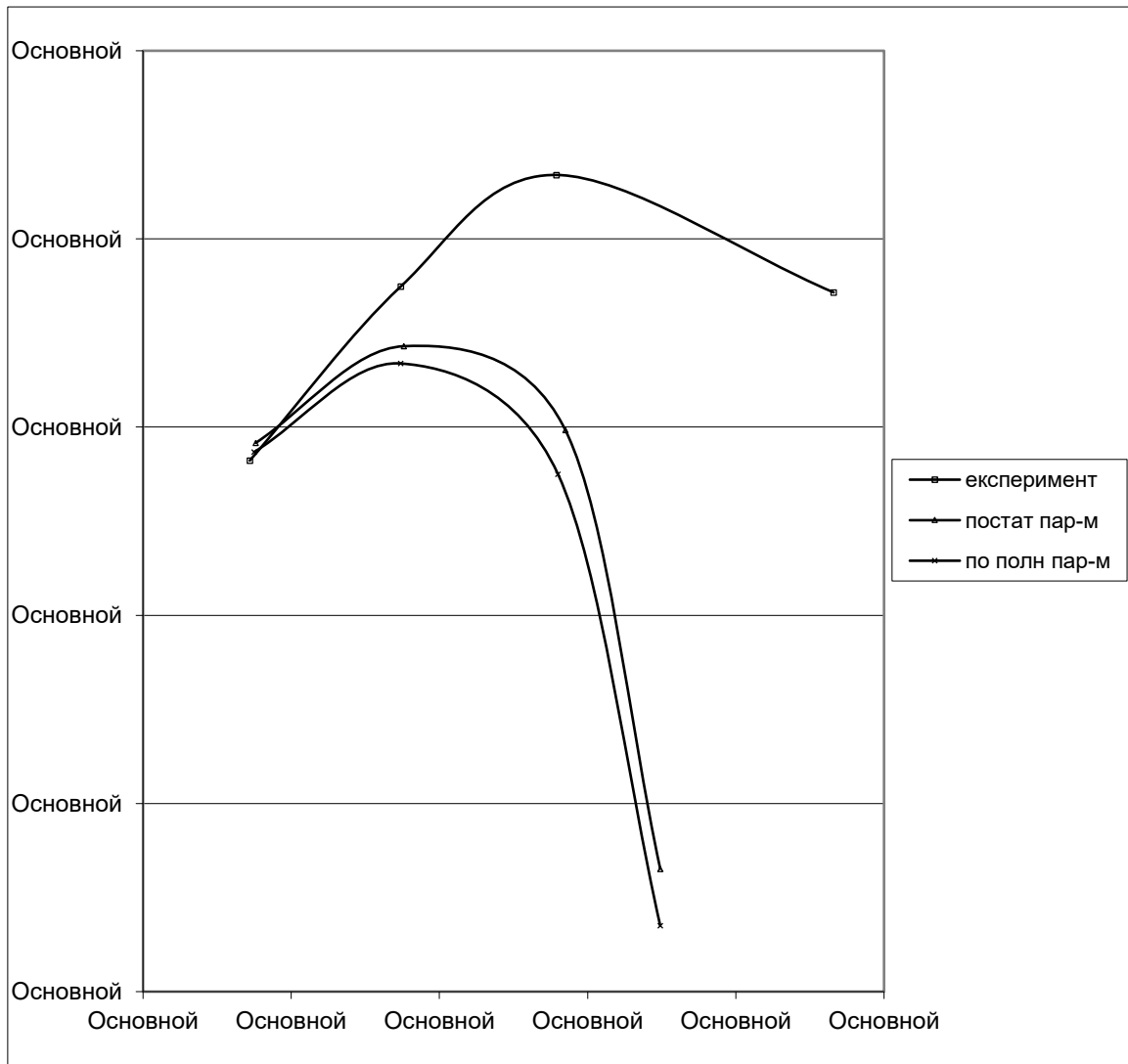


Рисунок 6.5 Порівняння ккд

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 05.00.00.00 ПЗ

Лист

46

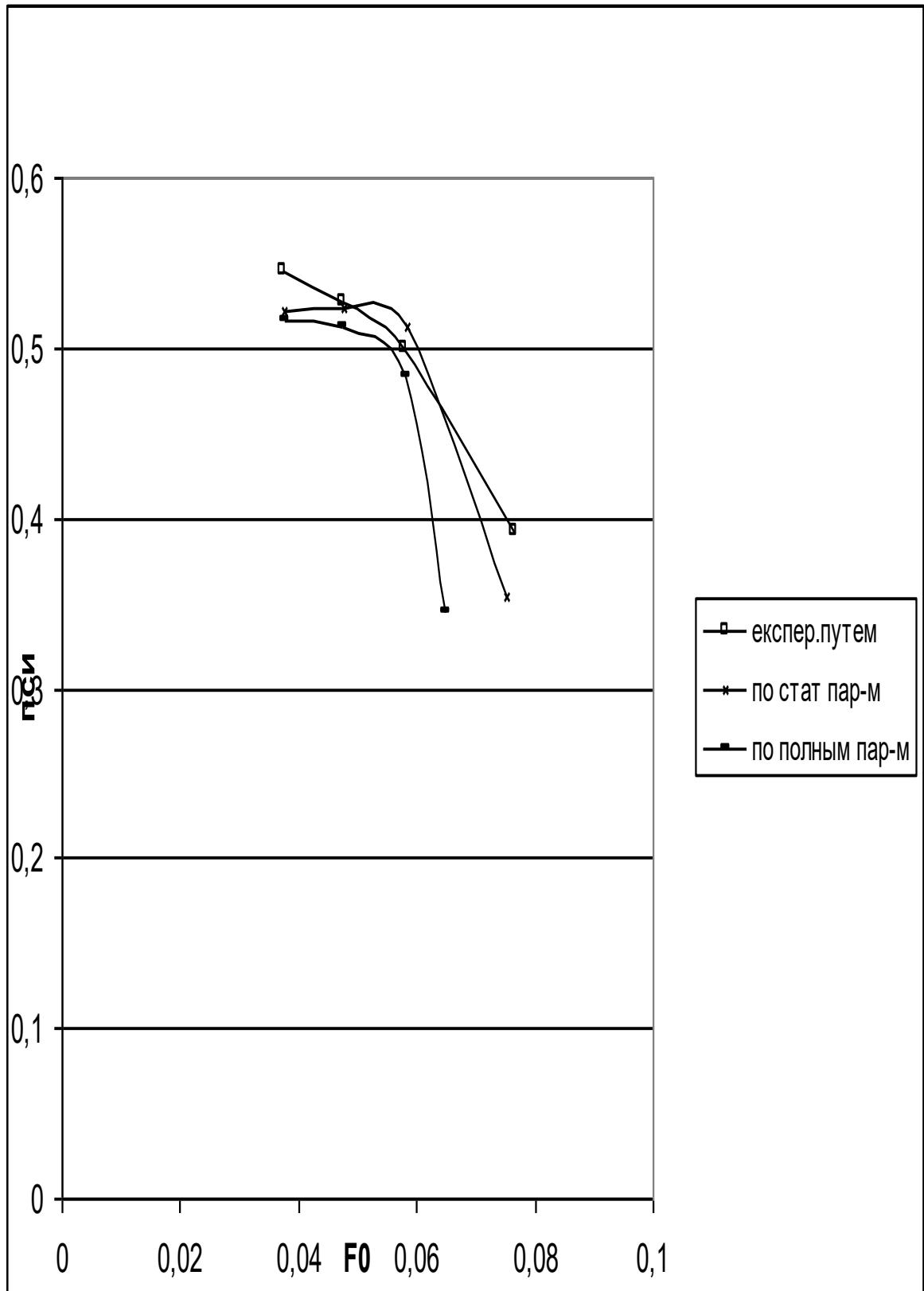


Рисунок 3.6,а) Порівняння пси ступеня

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 05.00.00.00 ПЗ

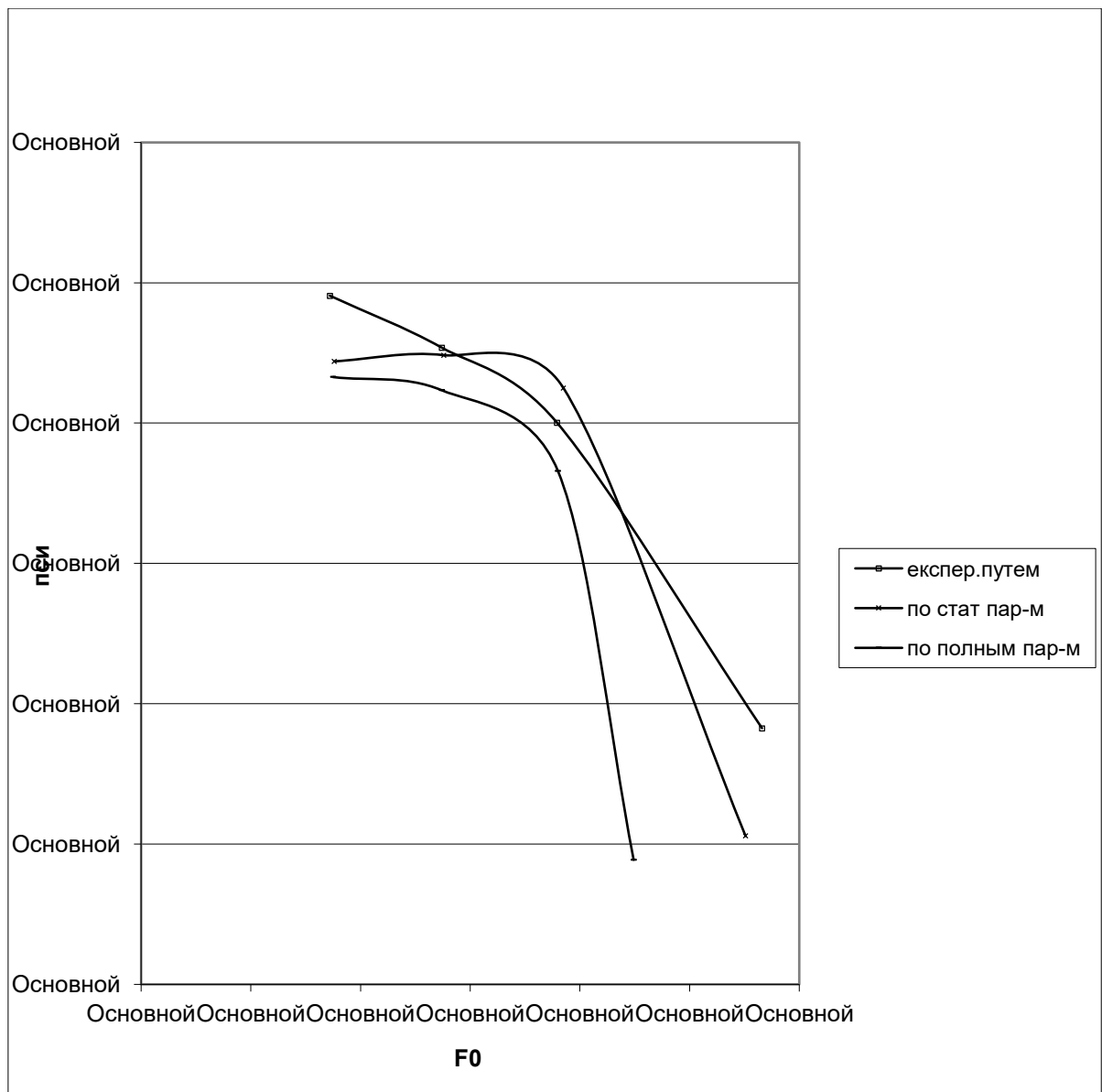


Рисунок 6.6,б) Порівняння пси ступеня

Як видно з графіка, різниця між точками на характеристичній кривій становить від 0,8% до 20%. Це пояснюється тим, що деякі точки знаходяться в зоні перенапруги і потребують додаткових налаштувань програмного комплексу FlowVision, таких як розрив розрахунку воїсітки нульової площини та внесення коригувань. Це вимагає вкладення часу в розрахунки та вимоги. Збільшується кількість комп'ютерних систем, на

яких він працює. Найцікавіші результати моделюють течію в зазорі робочого колеса відцентрового ступеня. Було проведено дослідження моделі кінцевого ступеню відцентрового компресора з двома робочими колесами (рис. 3.8) і кута виходу лопатей робочого колеса (рис. 3.10). Тривимірні моделі досліджуваного етапу наведені на (рис. 3.9, б), а наповнення тиском – у додатку Б.

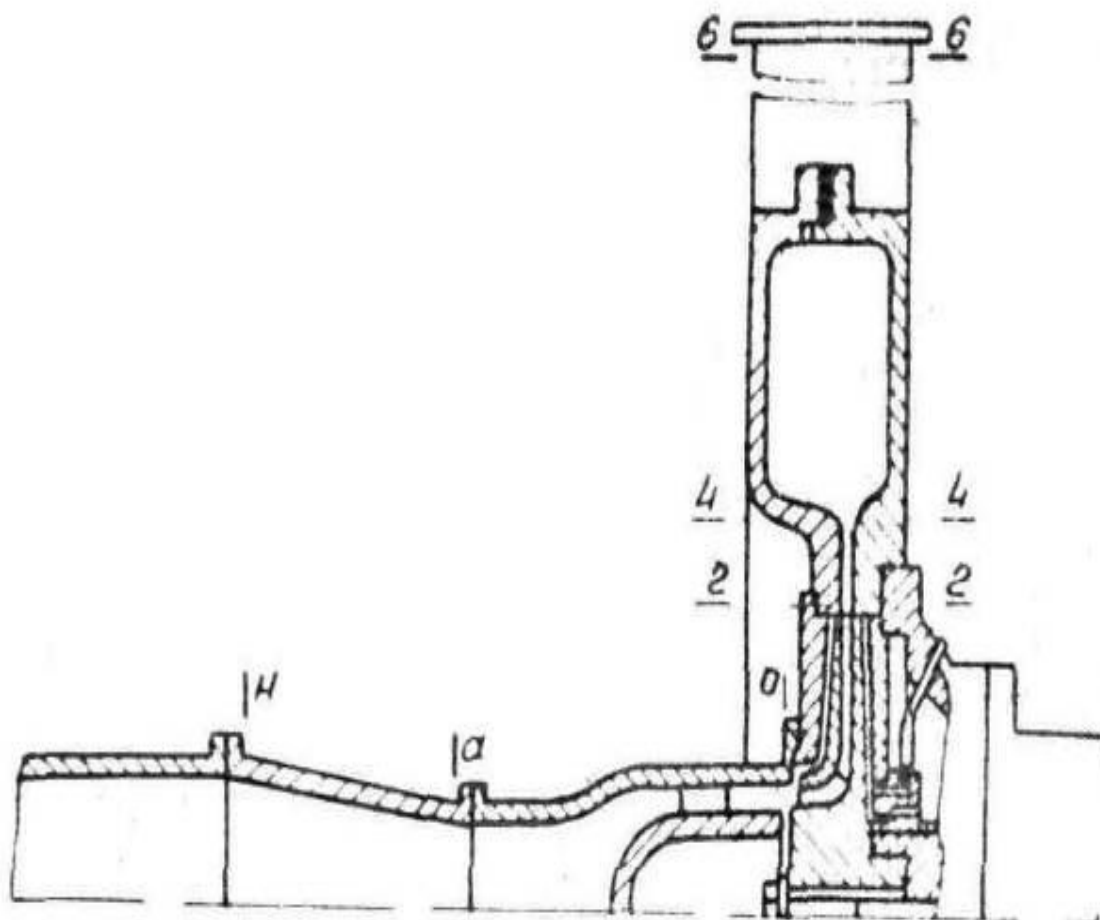
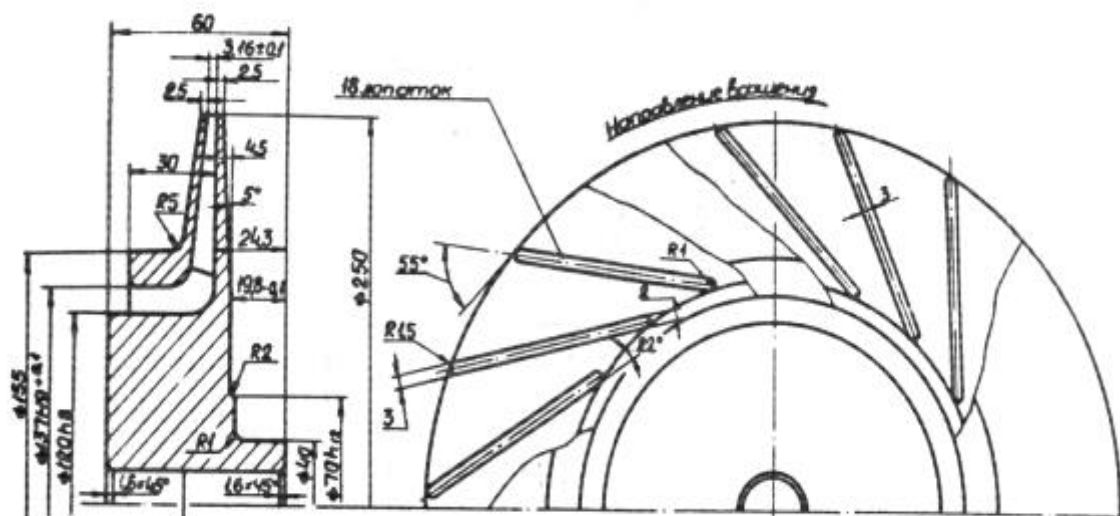
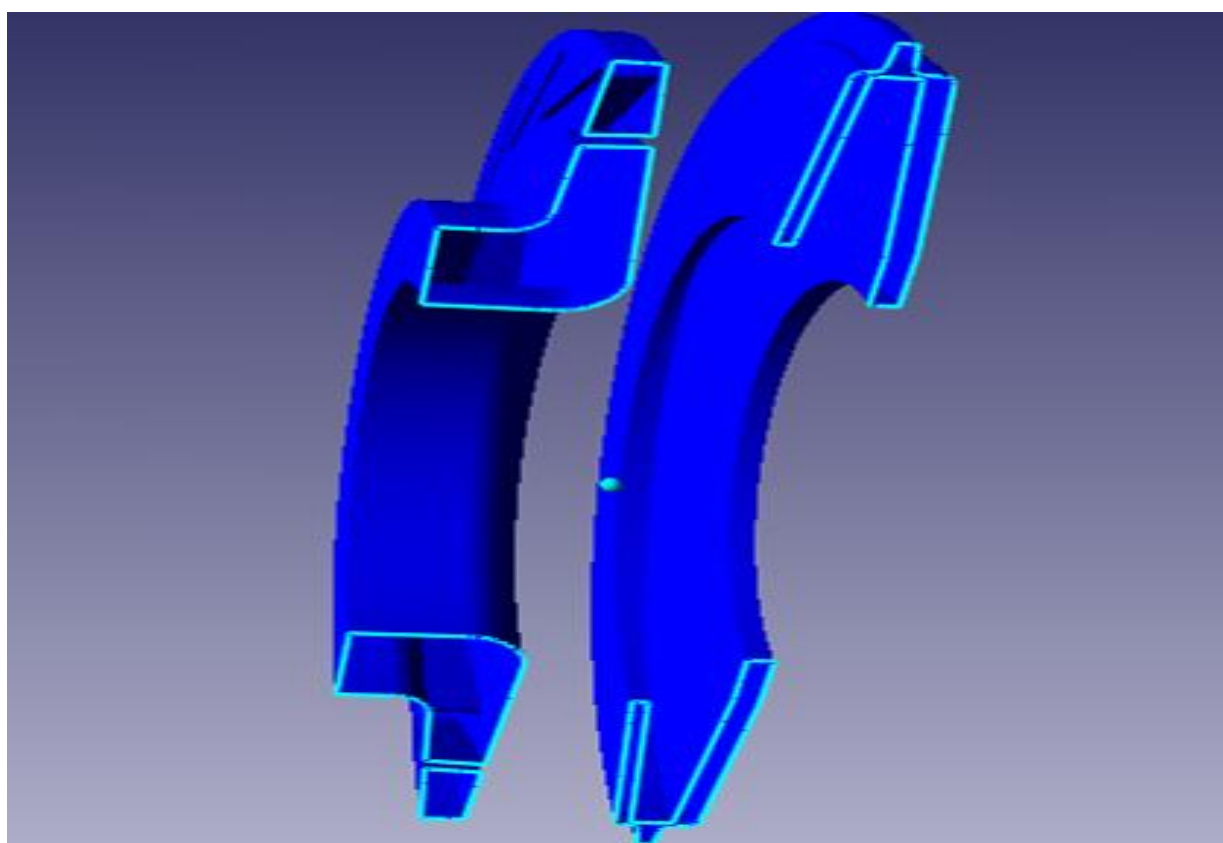


Рисунок 6.7 – Модельна ступінь повітродувки



а)



б)

Рисунок 6.8 – Геометрія модельного колеса (а)

Тримірна модель (б)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Принциповою відмінністю цього завдання є той факт, що гранична умова на зовнішньому діаметрі колеса формується закруткою потоку на виході з лопаток, яка для коліс різної напірні різна. Істотним є і несиметричність геометричної форми і характеру перебігу в передньому і задньому бічних зазорах.

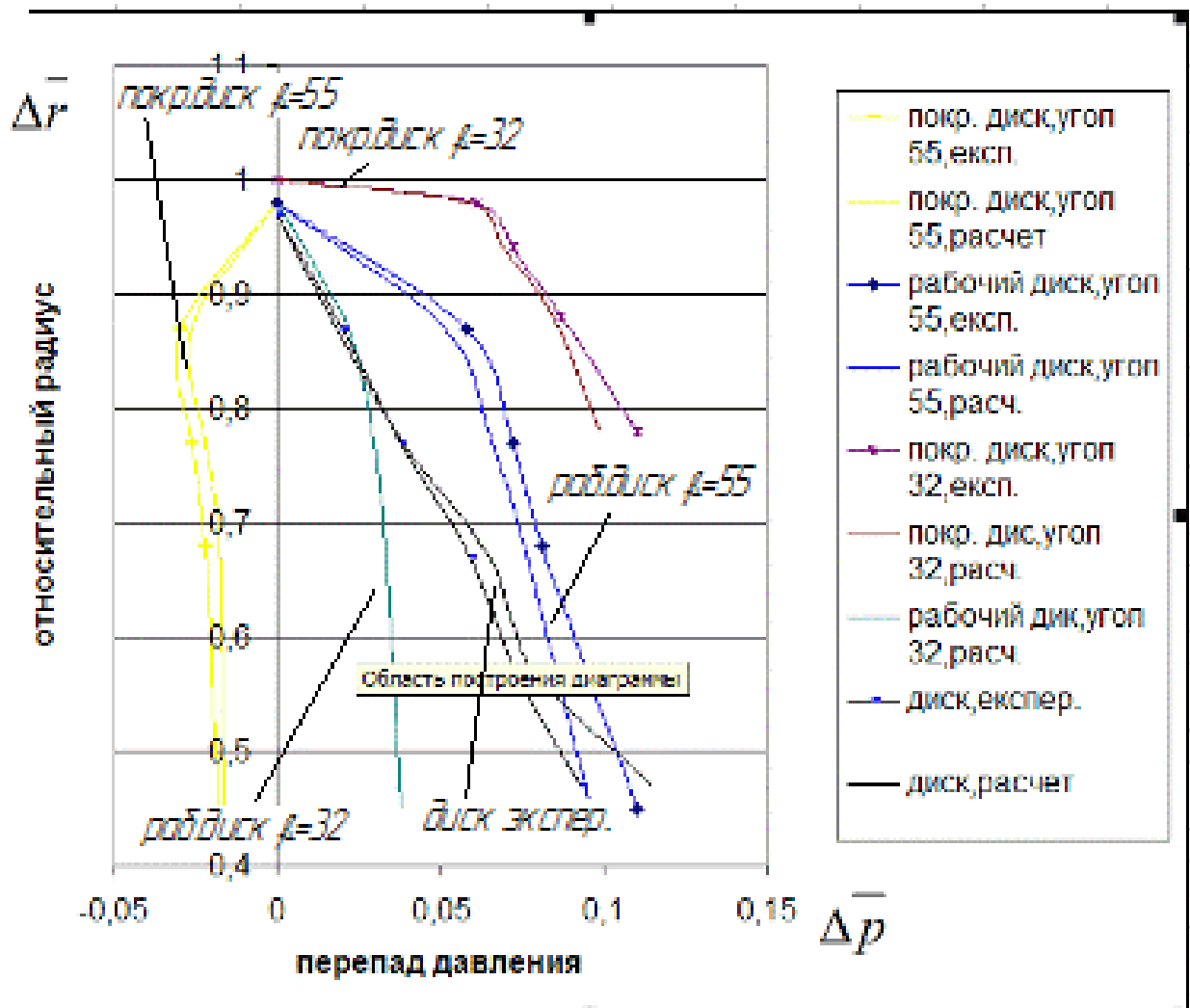


Рисунок 6.9 - Залежність перепаду тиску від відносного радіуса колеса для двох коліс з різними кутами нахилу лопаток (Точками вказані експериментальні дані)

Отримані на моделі залежності, наведені на малюнку (3.10), ілюструють дуже хорошу збіжність розрахункових даних з експериментальними для обох типів робочих коліс.

Зіставлення з результатами, отриманими для схем „ диск в кожусі ”, „ заглушене колесо ” і „ робоче колесо ступені ” при порівнянних умовах ( $\bar{S}, \bar{q} = idem$ ) (рис.3.11) свідчить про їх суттєву відмінність.

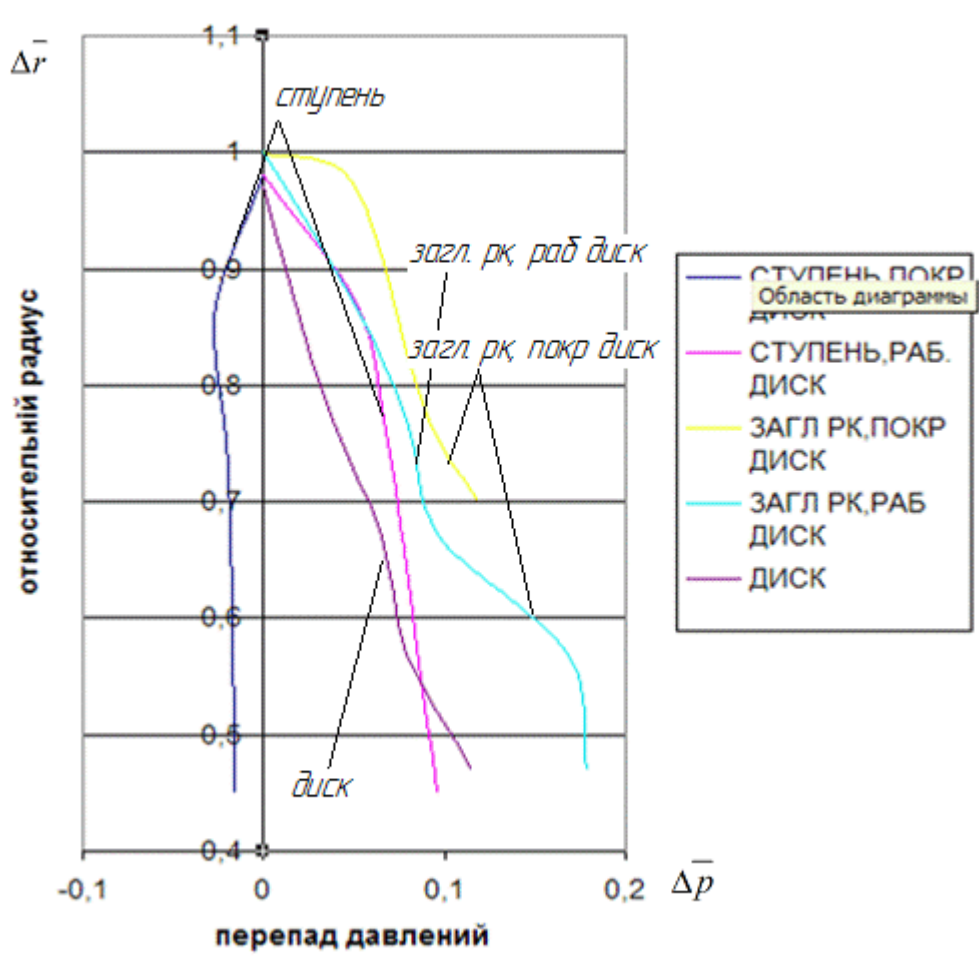


Рисунок 6.10 - Порівняння результатів за розрахунковими даними

Це означає, що розрахункові схеми спрощених моделей не можуть бути адекватними для реальної схеми „ робоче колесо в пазусі ступені ” для



обчислення осьової сили, що діє на робоче колесо. Найбільш перспективним є використання чисельного моделювання з реальною геометрією і реальними параметрами. Використовувана в даній роботі математична модель виявилася коректною для всіх розглянутих розрахункових схем і може бути застосована для шуканої мети - визначення осьової сили, що діє на робоче колесо відцентрового компресора.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

Як приклад було розглянуто ступінь відцентрового повітряного компресора, схема і параметри якої, наведені на рис. 4.1 і таблиці 1

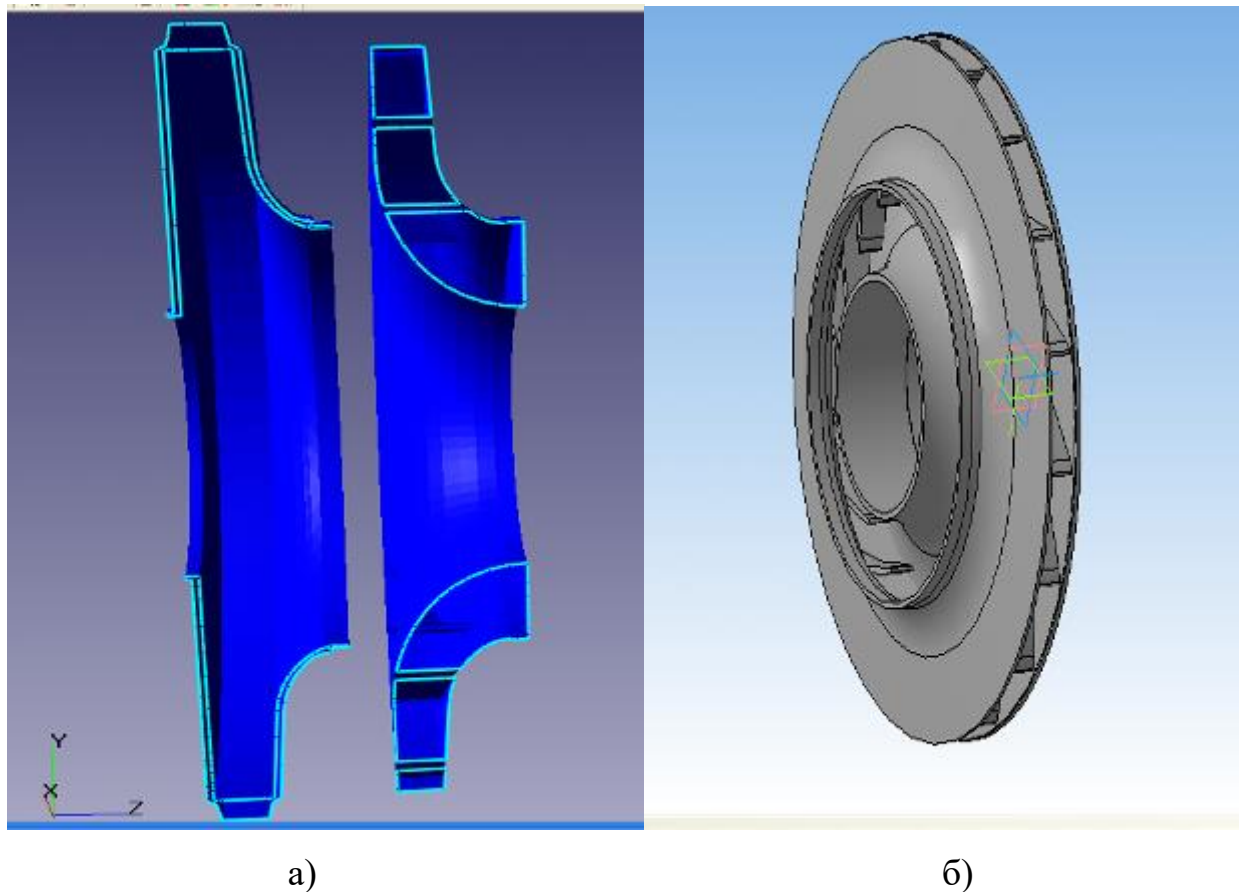
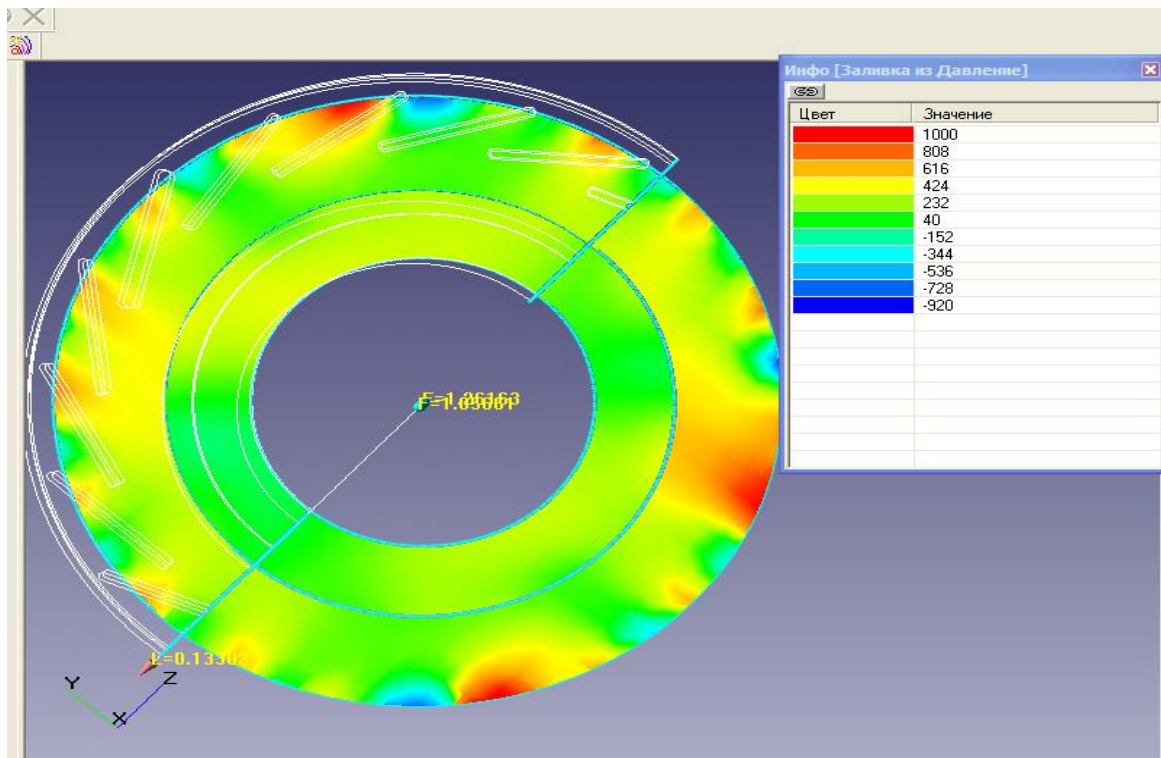


Рисунок 6.11 – а)тримірна модель проточної частини повітродувки  
б)тримірна модель робочого колеса



- тиск в задньому зазорі ступеня при  $\beta_{v2} = 55^\circ$

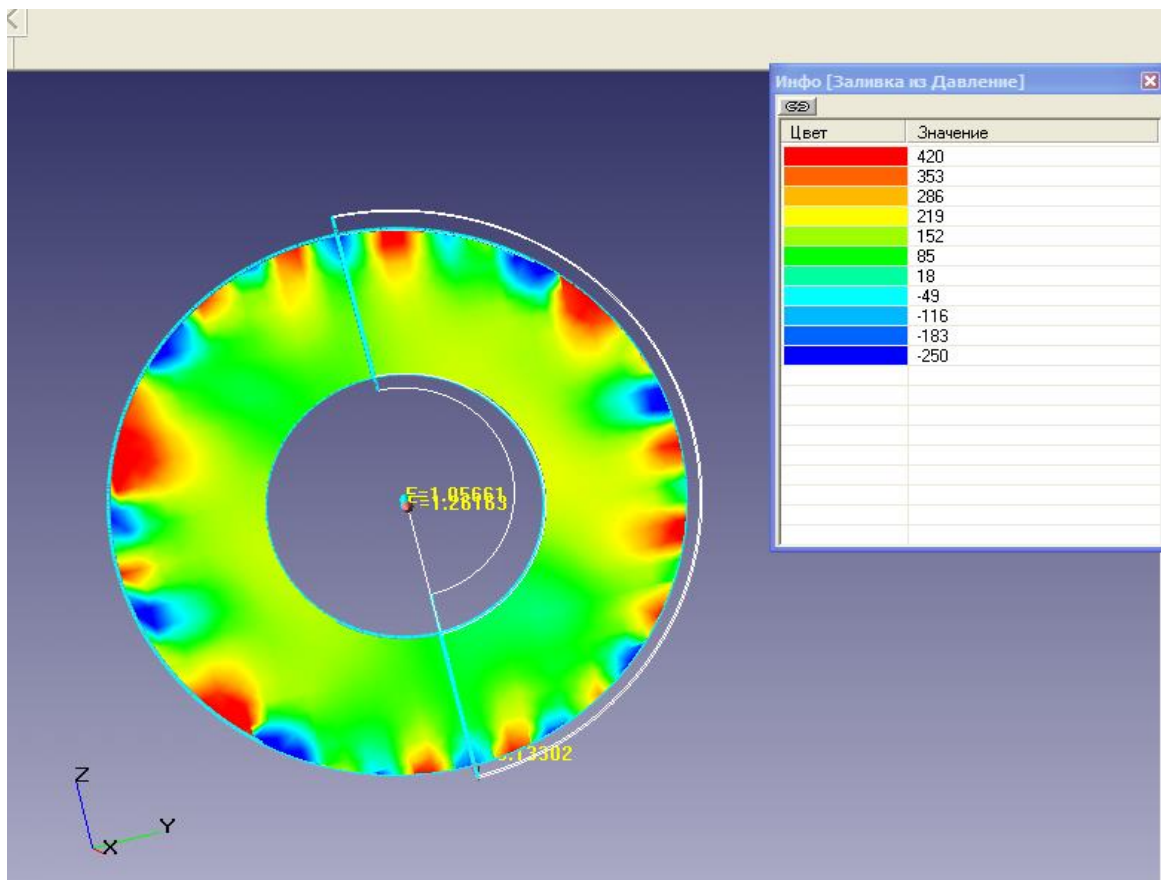


Рисунок 6.12 – Деякі візуалізації течії

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## 4. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Небезпечні і шкідливі фактори компресорного виробництва

Так як шарові крані з струминно-реактивними приводами використовуються на компресорних станція і по довжині магістральних газопроводів, то розглянемо небезпечні і шкідливі фактори компресорного виробництва. Небезпечними основними потенційними факторами при роботі компресора можуть бути:

- вибухонебезпечність;
- пожежонебезпека;
- ураження електричним струмом. До шкідливих потенційним чинників відносять:

- шум при роботі агрегату;
- вібрація. Протипожежний захист має забезпечуватися:
- засобами пожежогасіння;
- автоматичними установками пожежної сигналізації та пожежогасіння;
- засобами індивідуального та колективного захисту людей від небезпечних факторів пожежі. У виробничому приміщенні застосовуються головним чином вуглекислотні вогнегасники, перевагою яких є висока ефективність гасіння пожежі, схоронність електронного устаткування. Діелектричні властивості CO<sub>2</sub> дозволяють використовувати дані про вогнегасник, навіть якщо вогнегасник не можна вимкнути. Виробничими факторами називають небезпеки, які, впливаючи на працівників за певних умов, можуть призвести до травм або іншого раптового та швидкого погіршення стану здоров'я. Якщо до цього призводять виробничі фактори захворювання або зниження працездатності, то його вважають шкідливим (ГОСТ 12.0.002-80).

човинами; ищений рівень іонізуючих випромінювань;

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

трубопровідна арматура, складальні одиниці, елементи, деталі). До переліку піднаглядний продукції входять також прилади контролю та регулювання технологічних процесів, програмно-технічні комплекси управління технологічними процесами, системи протиаварійного захисту, їх елементи, вибухозахищене обладнання.

Обладнання повинно відповідати встановленим вимогам технічної безпеки, загальних правил вибухо- і пожежобезпеки виробничих комплексів, правилам будови і безпечної експлуатації повітряних чи газових компресорів.

Основні небезпечні та шкідливі чинники компресорного устаткування

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

Керівники підприємства, власник,зобов'язані щорічно розробляти та реалізовувати організаційно-технічні заходи для створення безпечних і нешкідливих умов праці при експлуатації компресорного устаткування, які повинні відповідати вимогам чинних законодавчих і нормативних актів про охорону праці та нормативно-технічної документації, забезпечувати постійний контроль за відповідністю обладнання умовами безпеки,

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

дотримання працівниками вимог норм і правил з охорони праці та обслуговування р обоча місця, використання індивідуальних засобів захисту. В даний час підприємства мають зношений парк обладнання(об'єктів), а коштів для його заміни і модернізації у них недостатньо. Тому підвищення його надійності і безпечної експлуатації є актуальним завданням. Необхідно продовжувати залишковий ресурсоб'єктів і економити кошти при проведенні ремонтів.

Не допускається залишати працюючі компресори( крім повністю автоматизованих) без нагляду осіб, допущених до їх обслуговування. Не допускається зберігання легкозаймистих рідин в приміщенні машинного залу компресорної установки.

Під час роботи компресорної установки слід контролювати

- а) тиск і температуру стисненого газу після кожного ступеня стиснення;
  - б) температуру стисненого газу після холодильників;
  - в) безперервність надходження в компресори і холодильники охолоджуючої води;
  - г) температуру охолоджуючої води, що надходить і виходить із системи охолодження по точках;
  - д) тиск і температуру масла в системі змащення;
  - е) величину струму статора, а при синхронному електроприводі- струму ротора електродвигуна;
  - ж) правильність дії лубрикантів і рівень масла в них. Показання приладів через встановлені інструкцією проміжки часу, але не рідше ніж через дві години, повинні реєструватися в журналі обліку роботи компресора.
- Застосування відкритого вогню в приміщенні компресорної станції не допускається. Виробництво монтажних і ремонтних робіт із застосуванням відкритого вогню та електрозварювання в приміщенні компресорної станції, проводиться відповідно до вимог нормативно- технічної документації на проведення цих робіт.

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		58

Повітропроводи і газопроводи слід укладати з ухилом 0,005 в бік лінійних водовідокремлювачів. Слід виключати утворення застійних зон і ділянок, де можуть накопичуватися конденсат або масло. На окремих ділянках трубопроводів, де можливе скупчення води і масла, слід встановлювати лінійні водороздільники з автоматичною або ручною продувкою, доступні для обслуговування. Всі пристрої для видалення скупчуються в повітропроводі масла і води необхідно регулярно перевіряти обслуговуючим персоналом. У разі замерзання цих пристроїв відігрівання їх дозволяється проводити гарячою водою, парою або гарячим повітрям. Застосування для цієї мети відкритого джерела вогню не допускається.( 7)

#### Правила безпеки при виконанні вантажних і транспортувальних робіт

Вантажні і транспортувальні роботи в процесі будь-якого виробництва мають досить велику питому вагу. Переміщення вантажів часто супроводжується необхідністю застосовувати важку фізичну працю, а іноді пов'язане ще й зі значним ризиком, особливо, коли роботи виконуються з небезпечними вантажами.

Небезпечні вантажі за характером безпеки при їх транспортуванні поділяються на 4 групи 1- малонебезпечні( плоди, овочі, продукти харчування, будівельні матеріали тощо); 2- небезпечні за своїми розмірами( великогабаритні та багатотонні конструкції, труби великої довжини та ін.); 3- вантажі, що пилять, димлять або перебувають в гарячому стані( вапно, крейда, асфальт, бітум, цемент насипом і т. п.); 4- небезпечні за своїми властивостями вибухівка, бензин, газ та ін.( вони, в свою чергу, згідно з ГОСТ 19433- 81, поділяються ще на 9 класів( вибухові; стиснені, зріджені або розчинені гази; пожежонебезпечні; отруйні, інфекційні; високотоксичні; радіоактивні тощо).  
Небезпечні вантажі повинні маркуватися спеціальними знаками безпеки, що

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

мають форму квадрата, поділеного тонкою горизонтальною лінією на два прямокутні трикутники і окантованого чорною рамкою. У верхньому трикутнику зображується знак небезпеки( вогонь, вибух, символ радіоактивності тощо), в нижньому- напис про небезпечність вантажу та номер класу небезпеки за властивостями. При проведенні робіт з такими вантажами треба бути особливо обережним та ретельно дотримуватися правил безпеки.

Кодексом законів про працю України встановлені граничні норми піднімання та переміщення вантажів однією людиною в залежності від статі та віку для чоловіків віком 18 років і старших-50 кг( допускається до 80 кг при одноразовому перенесенні на відстань по горизонталі до 25 м, за умови, що вантаж укладається на спину і знімається іншими вантажниками); для жінок старших за 18 років-7 кг при постійній роботі й 10 кг при чергуванні з іншою; для юнаків і дівчат 16- 17 років- 7 кг та 14, а для 17- 18 літніх- 8 та 16 кг відповідно. Ці норми є обов'язковим заходом, що захищає працівника від надмірної втоми і перевтоми при виконанні тяжких вантажних робіт. Одним з найважливіших завдань охорони праці є заміна фізичної праці механізованою, що зберігає здоров'я працівників, зменшує собівартість робіт та ризик отримати травму.

На промислових підприємствах, будівельних ділянках, електростанціях, в сільському господарстві і в торгівлі в процесі роботи обробляють і переміщують велику кількість різних вантажів. Високопродуктивна робота сучасного підприємства неможлива без застосування надійної техніки для навантажування, розвантажування та транспортування різних вантажів та чіткої організації праці. Для виконання цих операцій призначаються відповідальні, складаються технологічні та маршрутні карти вантажопотоків, визначаються та готуються місця перевалки та обробки вантажів, готується транспорт та необхідне обладнання.

Транспорт, в залежності від місця його застосування, поділяють на зовнішній і внутрішньозаводський. Зовнішній транспорт призначений для доставки



сировини, палива, напівфабрикатів, готової продукції та інших, необхідних підприємству вантажів, і для вивезення з підприємства готової продукції і відходів. Операції зовнішнього транспортування виконуються засобами автомобільного, залізничного, водного і повітряного транспорту, а іноді й гужевого.

Внутрішньозаводський( внутрішній) транспорт може бути міжцеховим і внутрішньоцеховим. Міжцеховий транспорт призначений для транспортування вантажів, сировини, напівфабрикатів, продукції по підприємству до місць їх обробки і зберігання та для видалення відходів виробництва. Вибір засобів міжцехового транспорту залежить від фінансових можливостей підприємства, масштабів і специфіки виробництва. На сучасних підприємствах з масовим і крупносерійним виробництвом міжцехове та внутрішньоцехове транспортування вантажів виконується, переважно, транспортувальними машинами безперервної дії- транспортерами( назву запозичено з французької мови), або конвеєрами( запозичено з англійської).

Внутрішньоцеховий транспорт застосовується для транспортування вантажів між цехами, виробничими дільницями, окремими агрегатами і робочими місцями та до внутрішніх складів, згідно з технологічним процесом виробництва, тобто для міжопераційного переміщення матеріалів та виробів при поточному методі виробництва. Механізація і автоматизація вантажно-розвантажувальних і транспортувально-складських робіт( ВРТСР) є одним із найважливіших резервів підвищення продуктивності праці, зниження собівартості продукції, поліпшення умов та підвищення безпеки праці. Керівники, що відповідають за проведення ВРТСР, повинні визначати порядок і методи їх проведення та використання механізмів і пристроїв, забезпечувати інструктаж та навчання з питань охорони праці. До їх обов'язків входить систематичний контроль за станом безпеки( за застосуванням і правильним користуванням робітниками спецодягом і індивідуальними засобами захисту,

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

за наявності необхідних знаків безпеки, за дотриманням норм перенесення вантажів, за забезпеченням працюючих інструкціями з правил безпеки і експлуатації обладнання, за станом чистоти і порядку на робочих місцях, в проходах і проїздах тощо).

До ВРТС робіт допускаються особи не молодше 18 років, що пройшли медичне обстеження, навчені безпечним методам праці і ознайомлені з діючими нормами, правилами й інструкціями з охорони праці.

Транспортні шляхи і проходи на території підприємства і в будівлях повинні відповідати санітарно-технічним вимогам, будівельним і протипожежним нормам. Місця, де проводяться ВРТСР, звільняються від зайвих вантажів, снігу, льоду, непотрібних предметів, а в необхідних випадках посилаються піском.

Правила безпеки при монтажі та експлуатації транспортних машин та транспортних засобів.

Транспортери, або конвеєри, є основними засобами комплексної механізації і автоматизації транспортних, навантажувально-розвантажувальних робіт. У технологічних процесах для транспортування сировини і інших вантажів застосовуються стаціонарні і пересувні транспортери різних типів і конструкцій підвісні, горизонтальні, похилі, пластинчасті, ланцюгові, стрічкові, скребкові, роликові, ковшові, гвинтові, вібраційні та інші. Для запобігання травмуванню людей рухомі частини транспортерів (привідні та натяжні пристрої, вимикаючі барабани, опорні та підтримуючі стрічку ролики, пасові й інші рухомі елементи передач, шківни, муфти, кінці валів і тому подібне) в зонах робочих місць, до яких можливий доступ обслуговуючого персоналу і осіб, що працюють поблизу і можуть опинитися біля конвеєра, повинні бути огорожені металевими кожухами або сіткою. Тягарі вертикальних натяжних станцій повинні огорожуватись на висоту не менше 2 м від підлоги.

Для обслуговування транспортерів допускаються особи, які пройшли навчання (відповідний інструктаж) з охорони праці. Перед пуском

транспортера в роботу необхідно провести його зовнішній огляд, перевірити кріплення всіх частин, наявність заземлення, справність електрообладнання. Провести пробний холостий запуск без завантаження. Перевірити, чи спрацьовують кінцеві вимикачі. Впевнившись, що транспортер працює справно, можна приступати до його експлуатації. Усунення виявлених недоліків, регулювання і налагодження вузлів, натяг ланцюгів і стрічки, змащення поверхонь, що труться, та очищення транспортера необхідно проводити при його повній зупинці, вимкненому електродвигуні і заблокованій проти можливості вмикання пускової кнопки. При виконанні цих робіт необхідно повісити на пусковому пристрої плакат " Не вмикати- працюють люди!" Органи управління( рукоятки, кнопки та інше) встановлюють в місцях, які забезпечують добрий нагляд за конвеєром під час його роботи. Транспортери обладнуються звуковою та світловою сигналізацією( сирена, дзвінок, світильники), що попереджує про їх запуск або про аварійну ситуацію. Транспортери в головній і хвостовій частинах повинні бути обладнані аварійними кнопками" Стоп" для миттєвої їх зупинки. Транспортери, що погано проглядаються по всій довжині, в місцях підвищеної небезпеки, у разі необхідності, додатково обладнуються кнопками" Стоп"( зі сторони проходу). Кнопки" Стоп" також встановлюються при великій довжині транспортера через кожні 10 м і фарбуються в червоний колір. Конструкція транспортера повинна виключати можливість падіння, зміни положення або сповзання вантажів, що транспортуються; це стосується транспортерів будь- якого типу та конструкції. Транспортери, призначені для транспортування вантажів, які виділяють пил, пару або газу, повинні обладнуватися аспіраційними системами або витяжною вентиляцією для видалення цих шкідливих речовин. А ті, що призначені для транспортування вологих або липких вантажів, повинні бути закриті кожухами або щитами в місцях, де можливе бризкоутворення, і мати пристрої для очищення від налипання бруду на транспортну стрічку, привідні, кільцеві

ВЗМ.	Лист	№ докум.	Твердись	Дата

КМ 05.00.00.00 ПЗ

Лист

63

та направляючі барабани. Пробуксовування стрічки по привідному барабану не допускається. У випадку його виникнення, воно повинно бути ліквідоване способами, передбаченими конструкцією транспортера( збільшенням натягу стрічки, збільшенням тиску пружинного ролика і т. п.). Робота стаціонарних стрічкових транспортерів без пристроїв, що контролюють швидкість, не допускається. При послабленні натягу стрічки забороняється змащувати привідні барабанів'язкими речовинами( смола, каніфоль і т. п.). Відстань від нижньої стрічки конвеєра до підлоги повинна бути не менше 0,15 м. Швидкість руху стрічки транспортера при ручному розвантаженні штучного вантажу повинна бути не більша

- 0,5 м/ с-	якщо маса вантажу не перевищує	5,0 кг;
- 0,3 м/ с-	якщо маса найбільшого вантажу перевищує	5,0 кг.

При автоматичному завантаженні і розвантаженні поштучного або сипкого вантажу швидкість може бути до 1 м/ с. На транспортерах, які входять до автоматизованих транспортних або технологічних систем, повинні бути передбачені пристрої для автоматичної їх зупинки у разі виникнення аварійної ситуації. У схемі управління транспортера також повинно передбачатися блокування, яке виключає можливість повторного його включення до ліквідації аварійної ситуації.

На технологічних лініях, які складаються із декількох транспортерів або конвеєрів, які послідовно встановлені і одночасно працюють разом з іншими машинами( живильниками, норіями, дробарками і т. п.), приводи транспортерів і всіх машин повинні бути заблоковані так, щоб у випадку раптової зупинки якоїсь з машин або конвеєра попередні транспортери або машини автоматично зупинялись, а наступні продовжували працювати до повного сходу з них вантажу. Транспортери з багатьма приводами повинні мати гальмові пристрої на кожному приводі.

Транспортери, крім підвісних, слід монтувати так, щоб відстань по вертикалі від верхніх виступаючих частин транспортера або вантажу, що

транспортується, до нижніх поверхонь виступаючих будівельних конструкцій( комунікаційних систем) була не менше 0,6 м. Для стаціонарних транспортерів повинна бути передбачена можливість механізованого або ручного прибирання підлоги від бруду або вантажу, що розсипався( зачистка) без їх зупинки. Для обслуговування і ремонту транспортерів повинні передбачатися проходи. Ширина проходів повинна бути не менше
 

- 0,7 м- для транспортера, що обслуговується з одного боку;
- 1,0 м- для пластинчастого транспортера, що обслуговується з двох боків;
- 1,0 м- між паралельно встановленими транспортерами;
- 1,2 м- між паралельно встановленими пластинчастими транспортерами, що обслуговуються з двох боків;

 Для монтажу і ремонту стаціонарних транспортерів мінімальна ширина проходів у виробничих приміщеннях повинна бути не менша 0,7 м; висота проходів- 2,2 м, і 1,8 м- для транспортерів, встановлених в галереях, тунелях і на естакадах. За необхідності, для переходу через транспортери, що мають довжину понад 20 м, в зручних місцях траси обладнують перехідні містки з площадками, шириною не менше 0,7 м, що мають поручні висотою не менше 1 м. Східці містків роблять з нахилом до горизонту не більше 45 °. На ділянках транспортерів, огляд яких проводять не частіше 1 разу за зміну, допускається встановлювати містки з вертикальними сідцями, шириною не менше 0,6 м. Настили містків і площадок повинні бути суцільними і неслизькими. Містки через транспортери повинні розміщатися на відстані один від одного не більше 50 м у виробничих приміщеннях і 100 м у галереях та на естакадах. Рольганги. При транспортуванні штучних вантажів на невеликі відстані широко застосовуються транспортувальні пристрої- рольганги. Рольганги, або роликові транспортери, можуть бути з електричним приводом і безприводні. Вантаж укладається на роликову доріжку і переміщується в горизонтальній або в похилій площині за рахунок кочення по роликах, що приводяться в дію

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

електроприводом( для горизонтального транспортування) або силою тяжіння вантажу( для похилого). Для створення безпечних умов праці на кінцях похилих рольгангів встановлюють гальмівні пристрої для обмеження швидкості. Якщо вантаж рухається зі швидкістю більше 1 м/ с, роблять пристрої у вигляді зустрічних нахилів, амортизаторів і т. ін. Ширина вантажу, що переміщується, не повинна бути більшою за ширину рольганга. Якщо розміри вантажу менші за відстань між трьома роликками, вантаж повинен переміщуватися на піддонах.

У місцях повороту роблять запобіжні борти висотою 0,12- 0,13 м, а по всій довжині- борти висотою не менше 0,06 м; відкидні секції повинні відкриватися у бік руху вантажу. Для знімання важких предметів з рольганга можуть застосовуватися різні пристрої. При ручному завантаженні стіл рольганга повинен мати нахил 2- 3 ° в бік руху вантажу і висоту від підлоги не більше 0,9 м. Всі ролики повинні бути зроблені із міцного матеріалу, що запобігає пошкодженню їх несучої поверхні, справними і легко обертатися. Конструкція рольганга повинна без деформації витримувати вагу вантажу, що переміщується. При роботі рольгангів не дозволяється стояти або залазити на його стійки та опори, для зручності обслуговування необхідно передбачити спеціальні площадки та пристрої.

Спуски. Для переміщення вантажів під дією сили тяжіння з вищого рівня на нижчий застосовуються спуски( роликові та похилі жолоби- склизи). Вони розташовуються похило або вертикально. Приймальні люки похилих спусків( склизів) і завантажувальні отвори, розташовані на рівні підлоги, закриваються щільними кришками і огорожуються з трьох боків перилами висотою від 1 м із суцільною обшивкою знизу на висоту не менше 0,2 м. Розвантажувальні отвори обладнують засувками, що регулюють вихід вантажу і запобігають його виштовхуванню при подачі нової порції вантажу, або упорами з пружинними амортизаторами для пом'якшення удару вантажу. Роликові спіральні спуски для запобігання випадіння вантажу обладнуються бортами з обох боків по всій довжині спіралі. Висота борта повинна

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

відповідати розмірам вантажу і бути не менше 0,25 м для будь-яких конструкцій спусків. Гвинтові ковзаючі спуски повинні мати таку ширину жолоба, щоб не відбувалось заторів від стискування вантажів при їх русі. Похилі спуски роблять міцної конструкції, а кут нахилу повинен забезпечувати плавне, без ударів, пересування вантажів. Вантажні візки. Вантажні візки полегшують працю людини при переміщенні вантажів. Недоліки їх полягають у тому, що працівник, при високо накладеному вантажі, не бачить шляху переміщення. Для запобігання травмування рук водія на рукоятках візків робляться скоби. В візках відсутні гальмівні і сигнальні пристрої, тому при транспортуванні візка з вантажем по схилах та на підйом обслуговування його необхідно доручати декільком працівникам, щоб запобігти неконтрольованому рухові візка. При перевезенні на візках посудин з гарячою рідиною, на візок можна ставити лише одну посудину, при цьому рух візка повинен здійснюватися плавно, без раптових зупинок. Для постійного переміщення різних вантажів з однієї ділянки виробництва на іншу інколи застосовуються електричні візки, що рухаються по рейковому шляху за допомогою тросу. Рейковий шлях повинен бути прокладений так, щоб рейки не виступали вище рівня підлоги, а приводні пристрої були огорожені. В місцях проїзду механічного візка через дверні проходи необхідно забезпечити вільний простір, шириною не менше 0,7 м. Кнопковий пульт управління розміщують на видимому місці. Схема пульта управління повинна бути влаштована так, щоб при зніманні рук з нього візок зупинявся.

Підйимально-транспортувальні машини, механізми та пристрої

Вимоги безпеки

На підприємствах машинобудівної, харчової, переробної, легкої промисловості та багатьох інших для завантаження, розвантаження та переміщення різноманітних вантажів широко застосовуються стаціонарні та

					КМ 05.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

нестаціонарні різноманітні вантажопідіймальні і транспортні машини та механізми.

У більшості випадків, це електрифіковані машини або механізми з ручним приводом- тельфери, талі, підіймальні крани різноманітних типів, підвісні шляхи, лебідки, домкрати, похилі спуски тощо. Всі вони потенційно небезпечні в експлуатації. Небезпека полягає в можливості механічного травмування робітника в процесі транспортування та виконання ручних операцій завантаження і розвантаження, а при роботі з електрифікованими машинами також існує небезпека ураження працівника електричним струмом при недотриманні правил експлуатації та електробезпеки.

Талі- це підвісні вантажопідіймальні механізми з ручним або електричним приводом. Ручні талі призначені для піднімання вантажів масою до 10 т, головним чином, при монтажі й демонтажі обладнання. Їх приводять в дію за допомогою перетягування руками нескінченного( замкнутого) ланцюга. За такої конструкції цього пристрою є небезпечним зношення ланок ланцюга і ведучої зірочки. В даному випадку зубці зірочки не співпадають при роботі з отворами ланок ланцюга, і це призводить до зриву та різких ривків ланцюга, що викликає перенапруження в механізмі, підвищує небезпеку поломки(можливий обрив ланцюгів або канатів).

Механізми з ручним приводом( талі, лебідки, домкрати) для утримування вантажу, що піднімається, повинні мати храпове колесо. У домкратів з гідравлічним приводом для цієї мети служить зворотний клапан. Для спуску піднятого вантажу у храповиків відводиться блокувальна собачка, а у гідравлічних домкратів відкривається зворотній клапан.

Ручні вантажопідіймальні талі повинні мати суцільноковані, без тріщин та зношення, ланки підвісного ланцюга і напрямних, про- вушину для ведучого ланцюга; бути добре змащеними та мати вільний хід. Талі з електричним приводом можуть бути встановлені стаціонарно або на візках, що рухаються по підвісних шляхах( монорейках). До початку роботи перевіряють справність



вантажного ланцюга і захоплювальних органів, надійність кріплення талі до візка або до нерухокої опори балки, козлів або до монорейки.

ВИСНОВКИ

					КМ 05.00.00.00.77 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Наявність	Дата		79

1. В даній роботі розглянуті можливості застосування газового нагнітача базової конструкції для роботи в агресивних середовищах.
2. Проведені порівняльні характеристики сталей, які застосовуються в середовищі які містять нітрозні гази і вибір матеріалу.
3. Обґрунтована конструкція колеса. Найбільш типовою, з точки зору міцності і корозійної стійкості є клепаний варіант виконання колеса із сталі 14X17H2 з застосуванням заклепок із пластичної корозійностійкої сталі 12X18H10T. При виготовленні робочого колеса таким чином матеріал дисків не піддається термічним впливам і зберігає властивості, які властиві заготовкам, які визначаються шляхом механічних випробувань зразків, які вирізані з заготовок.
4. Проведена класифікація корозійних процесів.
5. Виконаний розрахунок на міцність робочого колеса. Максимальні сумарні еквівалентні напруги на втулці колеса на робочій частоті обертання дорівнюють 418 МПа, запас міцності  $n = 1,555$  відповідно, умова міцності для сталевих колес виконується.
6. Виконані газодинамічні розрахунки повітродувки, проведене чисельне дослідження з використанням програмного комплексу FV, проведена верифікація отриманих результатів, отримані візуалізації течії.
7. В розділі охорона праці описані небезпечні і шкідливі фактори компресорного виробництва, правила безпеки при виконанні вантажних і транспортувальних робіт

## Список використаних джерел

1. В.Ф.Рис. расчет дисков турбомашин. Ашгиз, М.,Л.,1959
2. тепловые и конструктивные расчеты холодильных машин, под редакцией И.А. Сакупа, «Машиностроение», 1987.
3. Г.С. Жирицкий, В.А. Стрункин, конструкция и расчет на прочность деталей паровых и газовых турбин, «Машиностроение» М.,1968
4. Г.С, Скубачевский. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. «Машиностроение». М., 1981.
5. И.А. Биргер и др., расчет на прочность деталей машин, справочник, М., «Машиностроение», 1979.

					КМ 01.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		72

Додаток А

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ			
Sigma=	2.6250	dTst =	12.706
Lps =	9577.2	Psit2=	0.7154
Psip =	0.5634	Alfa2=	21.38
Azvn =	340.17	U2w1 =	459.23
U2c2 =	420.65	Y =	1
U2 =	130.38	C2 =	100.17
dIs =	12.706	D2 =	0.8301
Mw11 =	0.2555	Mc21 =	0.2906
n =	3000.0		
1 -я ступень :			
T2 =	295.714	Eps2 =	1.0439
		b2o =	0.022

РАСЧЕТ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Диаметр входа в ОНА	D5 =	0.987	м
Наружный диаметр рабочих колес секции	D2 =	0.681	м
Диаметр расточки покрывн. диска РК след. ступ.	D0 =	0.384	м
Диаметр втулки РК следующей ступени	Dvt =	0.253	м
Ширина канала на выходе из диффузора	B4 =	0.0396	м
Толщина лораток ОНА	Delta6 =	0.0065	м
Абсолютная скорость на выходе из РК	C2 =	203.20	м/с
Абсолютная скорость на выхлде из диффузора	C4 =	97.13	м/с
Угол потока на выходе из диффузора	Alfa4 =	26.13	град
Угол отставания потока в ОНА	DAlfa6 =	2.00	град
Оптимальное значение густоты решетки в ОНА	L/t =	2.10	
Температура газа на входе в компрессор	Tn =	288.00	К
Температура газа на выходе из РК	T2 =	323.70	К
Теплоемкость при постоянном давлении	Cp =	2600.0	Дж/(кг.К)
Плотность газа на входе в компрессор	Ron =	40.890	кг/м3
Коэффициент сжимаемости газа	Zn =	0.890	
Газовая постоянная	Rn =	511.70	Дж/(кг.К)
Газодинамическая функция	Sigma =	3.1353	
Эмпирический коэффициент	Ku =	1.000	
Эмпирический коэффициент	Ktr =	1.350	
Эмпирический коэффициент	Kf =	1.000	
Отн. радиус кривизны простр. траектории потока	Rok/B4 =	7.00	

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Ширина канала ОНА на входе	B5 =	0.0396	
Ширина канала ОНА на выходе	B6 =	0.0520	м
Наружный диаметр ОНА на выходе	D6 =	0.4308	м
Абсолютная скорость на входе в ОНА	C5 =	77.47	м/с
Абсолютная скорость на выходе из ОНА	C6 =	74.60	м/с
Угол потока на входе в ОНА	Alfa5 =	33.51	град
Лопаточный угол на входе в ОНА	Alfa5 =	34.00	град
Лопаточный угол на выходе из ОНА	Alfa6 =	92.00	град
Радиус наружного обвода канала ОНА	R0 =	0.0234	м
Число лопаток ОНА	Z6 =	14	
Плотность газа на входе в ОНА	Ro5 =	54.856	кг/м3
Плотность газа на выходе из ОНА	Ro6 =	54.886	кг/м3
Температура газа на входе в ОНА	T5 =	330.49	К
Температура газа на выходе из ОНА	T6 =	330.57	К
Давление газа на входе в ОНА	P5 =	8.256	МПа
Давление газа на выходе из ОНА	P6 =	8.263	МПа

										Лист
										73
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КМ 01.00.00.00. ПЗ					

Коэффициент стеснения потока на входе в ОНА Tau5 = 0.931  
 Коэфф. стеснения потока на выходе из ОНА Tau6 = 0.932  
 Площадь проходного сечения на входе в ОНА F5 = 0.06392 м2  
 Площадь проходного сечения на выходе из ОНА F6 = 0.06554 м2  
 Радиус лопатки ОНА Rl = 0.2409 м  
 Радиус окружности центров лопаток ОНА Rc = 0.3232 м  
 Внутренний радиус поворотного колена Rkk = 0.0488 м

ORt	Rt	Bt	Alfalt	F	Deltat
-	м	м	град	м2	м
0.95	0.480	0.040	37.39	0.0640	0.0168
0.90	0.466	0.041	40.56	0.0641	0.0235
0.75	0.424	0.043	49.25	0.0643	0.0361
0.60	0.382	0.045	57.22	0.0646	0.0402
0.50	0.354	0.046	62.36	0.0647	0.0394
0.40	0.327	0.047	67.47	0.0649	0.0364
0.25	0.285	0.049	75.32	0.0651	0.0281
0.10	0.243	0.051	83.75	0.0654	0.0162
0.05	0.229	0.051	86.79	0.0655	0.0115

#### РАСЧЕТ РАБОЧИХ КОЛЕС

Диаметр патрубка Dpt = 0.518 м  
 1-` критическая частота вращения Nkr1 = 3920.9 об/мин  
 Диаметр вала под рабочим колесом Dv = 0.214 м  
 Диаметр расточки покрывного диска D0 = 0.384 м  
 Диаметр на входе в лоп. решетку D1 = 0.388 м  
 Относительный диаметр решетки на входе D1/D2 = 0.570  
 Условный коэффициент расхода первой ступени F = 0.0669  
 Коэффициент теорет. напора PsiT2 = 0.7295  
 Коэффициент внутреннего напора Psii = 0.7514  
 Окружная скорость в сечении 1-1 U1 = 148.11 м/с  
 Окружная скорость в сечении 2-2 U2 = 260.04 м/с  
 Отн. скор. на входе в решетку РК 1 ступ. W1 = 178.72 м/с  
 Отношение W1/W2беск. W1/W2 = 2.13  
 Число Маха в относительном движении Mw1 = 0.423  
 Абсолютная скорость в сечении 2-2 C2 = 203.20 м/с  
 Угол лопаток в сечении 1-1 Beta1 = 33.00 град  
 Угол между S2 и U2 Alfa2 = 21.00 град  
 Число лопаток на входе в РК Z1 = 25  
 Число лопаток на выходе из РК Z2 = 25  
 Относительная густота лопаточной решетки L/t = 3.09  
 Коэффициент стеснения потока на входе в РК Tau1 = 0.889  
 Коэффициент стеснения потока на выходе из РК Tau2 = 0.960  
 Давление газа на входе в компрессор Pn = 5.399 МПа  
 Радиус средней линии лопаток Rl = 5.1534 м  
 Радиус окружности центров R0 = 4.9919 м  
 Угол наклона покрывного диска Teta = 7.17 град

Харак./Ступень		1
Dvt , м		0.226
ODvt		0.3325
C0 , м/с		84.67
T0 , К		286.6
Ro0 , кг/м3		40.473
P0 , МПа		5.319
C1 , м/с		100.03
T1 , К		286.1
Ro1 , кг/м3		40.309
P1 , МПа		5.287
T2 , К		301.9
DelTn2, К		13.869
Ro2 , кг/м3		45.210
P2 , МПа		6.257
B1 , м		0.0593
B2 , м		0.0409
Beta1 , град		34.03
I1 , град		-1.03

#### ПРОЕКТИРОВОЧНЫЙ РАСЧЕТ СБОРНОЙ КАМЕРЫ

ПО МЕТОДИКЕ В.Ф.РИСА

#### ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Диаметр выхода из диффузора	D4 =	840.0 мм
Угол потока на выходе из диффузора	Alfa4 =	28.0 град
Внутренний радиус поворотного колена	rk.k =	35.5 мм
Радиус скруглений сборной камеры	r1 =	50.3 мм
Радиус скруглений сборной камеры	r2 =	50.3 мм
Радиус скруглений сборной камеры	r3 =	50.3 мм
Ширина на выходе из диффузора	b4 =	32.8 мм
Ширина на входе в сборную камеру	b5 =	42.6 мм
Скорость потока на выходе из диффузора	c4 =	129.4 м/с
Окружная скорость рабочего колеса	u2 =	239.3 м/с
Внутренний напор	Psii =	0.7510

#### РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Ширина сборной камеры	bcp =	288.7 мм
Высота сборной камеры	hk =	179.9 мм
Внутренний диаметр	Dвн =	636.6 мм
Наружный диаметр камеры	Dк =	996.3 мм
Площадь сечения сборной камеры	fk =	0.0503 м2
Кэффициент	A0 =	0.0561
Кэффициент потерь	Dzeta4 =	0.5362
Потери к.п.д.	Delh4 =	0.1044

					KM 01.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75