

Сумський державний університет МОН України
Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України
Концерн «НІКМАС»
ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш»
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу МОН України

КОМПРЕСОРНЕ УСТАТКУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНІВ

Монографія

За загальною редакцією академіка НАН України А. Ф. Булата

Суми
Сумський державний університет
2016

УДК 621.452.3
ББК 31.762.9
К63

Авторський колектив:

А. Ф. Булат, доктор технічних наук, академік НАН України;
Г. В. Кирик, доктор технічних наук;
Г. А. Бондаренко, кандидат технічних наук, професор;
П. Є. Жарков, кандидат технічних наук;
М. М. Лях, кандидат технічних наук, професор;
Б. О. Блюсс, доктор технічних наук, професор;
В. Г. Шевченко, доктор технічних наук

Рецензенти:

Г. І. Слинко – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання Запорізького національного технічного університету МОН України;
В. І. Дирда – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу механіки еластомірних конструкцій гірничих машин Інституту геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України (м. Дніпропетровськ)

*Рекомендовано до друку вченою радою
Інституту геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України
(протокол № 7 від 31 травня 2016 року)*

*Рекомендовано до видання
вченою радою Сумського державного університету
(протокол № 1 від 30 серпня 2016 року)*

Компресорне устаткування в технологіях видобутку вуглеводнів :
К63 монографія / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, Г. А. Бондаренко та ін. ; за заг. ред.
акад. НАН України А. Ф. Булата. – Суми : Сумський державний університет,
2016. – 305 с.
ISBN 978-966-657-643-2

Монографія присвячена науковому обґрунтуванню, створенню та широкому впровадженню сучасного енергозбережного компресорного устаткування нового покоління і технологій його застосування в різних галузях промисловості.

У монографії вирішено важливу науково-технічну проблему розвитку наукових основ створення нових композиційних матеріалів деталей і вузлів компресорного устаткування, а також методів розрахунку й конструювання теплообмінних апаратів та вдосконалення методів розраховування режимних параметрів компресорних установок і створення на цій базі компресорного устаткування нового покоління та способів його застосування при видобутку нафти, газу, вугілля, шахтного метану для підвищення ефективності та безпеки процесів в інших галузях промисловості, що має важливе значення для сталого розвитку України.

На підприємствах вугільної промисловості України впроваджено більше 1 000 установок компресорних шахтних УКГШ, у воєнізованих гірничорятувальних загонах упроваджені станції азотні мембранні гвинтові пересувні АМГП, на вугільних шахтах – установки компресорні газоутилізаційні УКГ-5/8 (3 установки продуктивністю 1 551 м³/год) (усього за допомогою установок утилізовано більше ніж 21 млн м³ газу метану, загальне напрацювання становило близько 60 тис. год). Гірничо-збагачувальні комбінати України, Білорусі, Казахстану, Узбекистану, Туркменістану, Монголії та інших країн забезпечено більше ніж 210 компресорними установками для бурових верстатів. Виготовлено понад 550 одиниць гальмових гвинтових компресорних установок ВВ-3,5/10, що успішно експлуатуються на електровозах, тепловозах та ін.

Фактичний економічний ефект від упровадження компресорного устаткування нового покоління становить десятки мільярдів гривень.

Для фахівців у галузі компресорного машинобудування, викладачів, аспірантів і студентів ВНЗ відповідних спеціальностей.

УДК 621.452.3
ББК 31.762.9

© Булат А. Ф., Кирик Г. В., Бондаренко Г. А. та ін., 2016
© Сумський державний університет, 2016
ISBN 978-966-657-643-2

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНОГО КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ.....	10
1.1. Фундаментальні розробки з удосконалення методів розрахунку режимних параметрів компресорних установок.....	10
1.1.1. Обґрунтування переходу від схеми централізованого повітропостачання шахт до локальних компресорних станцій.....	10
1.1.2. Вдосконалені методи і способи регулювання компресорів.....	11
1.1.2.1. Регулювання поршневих компресорів.....	11
1.1.2.2. Регулювання гвинтових компресорів.....	13
1.1.2.2.1. Система регулювання холостого ходу шахтних компресорів.....	14
1.1.2.2.2. Регулювання шляхом переведення компресора на холостий хід...	16
1.1.2.2.3. Ефективність регулювання переходом на холостий хід.....	22
1.1.2.2.4. Закономірності зміни енергетичних характеристик регулювання гвинтового компресора в режимі холостого ходу.....	24
1.1.2.3. Регулювання відцентрових компресорів.....	25
1.1.2.4. Переривчасте регулювання компресорів.....	27
1.2. Моделювання нестаціонарних режимів течії потоків, що несуть суспензію, у трубопровідних системах «компресор – гірничо технологічне устаткування»	29
РОЗДІЛ 2. ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ.....	38
2.1. Нові розробки у сфері створення нових композиційних матеріалів деталей і вузлів компресорного устаткування.....	38
2.1.1. Дослідження втомного руйнування деталей шахтних компресорних машин.....	38
2.1.2. Дослідження властивостей композиційних матеріалів промислового призначення з металевою матрицею.....	42
2.1.2.1. Вплив складу і способу виготовлення наповнювача на механічні властивості композиційного матеріалу.....	42
2.1.2.2. Вплив складу матриці на механічні властивості композиційного матеріалу.....	47
2.1.2.3. Композиційні матеріали для плакування поверхні сталі.....	52
2.1.3. Застосування композиційних матеріалів із металевою матрицею в деталях і вузлах компресорів.....	56
2.1.3.1. Композиційні метали в нерознімних з'єднаннях.....	56
2.1.3.2. Композиційний метал у жолобниках таврових з'єднань.....	58
2.1.3.3. Композиційний матеріал у плакованих сталевих деталях.....	62
2.1.4. Металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів на деталі та вузли компресорів.....	64
2.1.5. Виріб із двошаровим покриттям.....	65
2.2. Фундаментальні розробки у сфері створення методів розрахунку	

і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок.....	68
2.2.1. Вибір конструкції і технології виготовлення пластинчасто-ребристих теплообмінників.....	68
2.2.1.1. Конструкція пластинчасто-ребристого теплообмінника і теплообмінної поверхні.....	68
2.2.1.2. Визначення впливу особливостей теплообмінної поверхні з металевої сітки на ефективність пластинчасто-ребристих теплообмінників.....	74
2.2.1.3. Вибір матеріалу для пластинчасто-ребристих теплообмінників, що працюють у вологій атмосфері вугільної шахти.....	82
2.2.1.4. Особливості застосування сталі 20Х13 для паяних пластинчасто-ребристих теплообмінників компресорних установок.....	84
2.2.1.5. Удосконалення способів усунення дефектів теплообмінних апаратів.....	84
2.2.2. Випробування теплообмінних апаратів компресорних установок і закономірності зміни їх характеристик.....	86
2.2.2.1. Способи та устаткування для випробування теплообмінних апаратів.....	86
2.2.2.2. Методика визначення та закономірності зміни характеристик теплообмінних апаратів.....	89
2.2.2.3. Методи розрахунку та конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок.....	94
2.3. Розроблення методів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорних машин шляхом застосування високотемпературного вакуумного паяння.....	96
2.3.1. Технологія і способи паяння із широким паяльним зазором.....	96
2.3.2. Методи підвищення надійності та довговічності паяних робочих коліс відцентрових компресорних машин.....	100
2.3.2.1. Удосконалення конструкції й технології виготовлення коліс.....	100
2.3.2.2. Закономірності зміни надійності роботи паяного колеса шахтного відцентрового компресора при використанні таврового паяного з'єднання..	107
2.3.2.3. Дослідження формування комбінованого таврового з'єднання, виконаного паянням і зварюванням плавленням.....	109
2.3.2.4. Технологія автовакуумного паяння закритих робочих коліс.....	111
2.3.3. Методи підвищення надійності та довговічності теплообмінників шляхом застосування високотемпературного вакуумного паяння.....	114
2.3.3.1. Удосконалення конструкції й технології паяння пластинчасто-ребристих теплообмінників.....	114
2.3.3.2. Закономірності зміни довговічності тонкостінного теплообмінника шахтних компресорних установок при високотемпературному паянні.....	116
2.3.3.3. Дослідження процесу високотемпературного паяння шлікерним припоєм сталевих пластинчасто-ребристих елементів.....	120

РОЗДІЛ 3. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ РОДОВИЩ НА ОСНОВІ ЕНЕРГО-ЗБЕРЕЖНОГО КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ.....	124
3.1. Підвищення конденсатовіддачі газоконденсатних родовищ шляхом впливу на пласти азотом.....	124
3.1.1. Азотна компресорна станція для генерування інертного газового середовища.....	124
3.1.2. Азотна станція для накачування газоподібного азоту в свердловини газоконденсатних родовищ.....	125
3.1.3. Метод штучного впливу на пласти азотом для підвищення конденсатовіддачі (на прикладі Котелевського ГКР).....	129
3.2. Видобування газу за допомогою дотискних компресорних станцій СГВ (на прикладі Більського НГКР).....	132
3.2.1. Блокова компресорна станція для підвищення тиску в малодебітних свердловинах.....	132
3.2.2. Дотискні гвинтові компресорні станції паливного газу типу СГВ для живлення газотурбінних електростанцій.....	133
3.2.3. Компресорне устаткування для видобування, збирання і транспортування газу з низьконапірних та малодебітних свердловин.....	136
3.3. Способи одержання і транспортування попутного нафтового газу за допомогою компресорних станцій СКГ.....	143
3.3.1. Станції на базі компресорів серії ГШ.....	143
3.3.2. Серія СГВ із газопоршневим двигуном.....	145
3.4. Підвищення надійності та ефективності буріння і ремонту нафтових та газових свердловин.....	147
3.4.1. Азотні станції для ремонту нафтових і газових свердловин великої глибини.....	147
3.4.2. Буріння, розкриття продуктивних пластів та ремонт нафтових і газових свердловин із використанням високоефективних піногенеруючих пристроїв.....	147
3.4.2.1. Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв шляхом створення дрібнодисперсної стійкої піни.....	148
3.4.2.1.1. Особливості механізму піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу.....	148
3.4.2.1.2. Методи визначення оптимальної конструкції піногенеруючого устаткування.....	166
3.4.2.1.3. Використання компресорного устаткування нового покоління для піноутворення з можливістю регулювання основних параметрів.....	172
3.5. Комплекс устаткування для термогазового впливу на нафтовий пласт БКУ-20/35 У1.....	173
3.6. Підвищення ефективності газліфтного видобування нафти за допомогою компресорів нового покоління.....	177
3.7. Використання компресорних станцій для ремонту і випробувань магістральних газопроводів.....	180
3.7.1. Ремонт і випробування магістральних газопроводів за допомогою	

компресорних станцій СД, СДА, НДА.....	180
3.7.2. Устаткування для евакуації газу з магістральних газопроводів МКС-600.....	183
3.7.3. Комплект устаткування для ремонту та очищення магістральних нафтопроводів СДА-30/25 (N 95 %).	183
3.7.4. Компресорна станція високого тиску для випробування трубо-проводних арматур «Газпром» (БКУ-60/32 У1).....	184
3.8. Утилізація та когенерація шахтного газу-метану установками компресорними газоутилізаційними (УКГ).....	185
3.8.1. Розроблення установок для добування, утилізації та використання шахтного метану.....	185
3.8.2. Установа для дегазації підземних пластів.....	187
3.8.3. Станція для утилізації шахтного газу.....	188
3.8.4. Спосіб видобування метану.....	189
3.8.5. Розроблення установок для утилізації метану УКГ.....	190
3.8.6. Застосування технології та устаткування для підвищення метановіддачі вугільних пластів.....	194
3.9. Нові технології вироблення пневмоенергії в підземних умовах шахт за допомогою компресорів ВВ і УКГШ.....	200
3.9.1. Гвинтова шахтна компресорна установа.....	200
3.9.2. Оцінювання та способи підвищення надійності вузлів і блоків компресорних машин.....	202
РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСОРНОГО ОБЛАДНАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ В СИСТЕМАХ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПРИ ВИДОБУВАННІ ТА ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ.....	207
4.1. Способи попередження, локалізації, гасіння підземних пожеж у вугільних шахтах за допомогою азотних компресорних станцій АМГП... ..	207
4.1.1. Розроблення установок для інертизації атмосфери, попередження і гасіння пожеж у гірничих виробках, гвинтових компресорних станцій для одержання газоподібного азоту.....	207
4.1.2. Спосіб ліквідації початкової стадії підземних пожеж.....	211
4.1.3. Застосування пересувних азотних компресорних станцій із мембранним роздільним блоком.....	213
4.2. Гасіння пожеж на складах зберігання паливно-мастильних матеріалів із застосуванням високоефективних піноутворювальних пристроїв.....	217
РОЗДІЛ 5. ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОМПРЕСОРНИХ МАШИН У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	219
5.1. Технології термостатування аерокосмічних апаратів.....	219
5.2. Утилізація і когенерація звалищного газу установками УКГ.....	226
5.3. Гвинтові компресорні установи для бурових станків типу СБШ у рудовидобувній промисловості.....	227
5.4. Пересувні гвинтові компресорні станції серії ВВП для будівельно-монтажних робіт.....	229
5.5. Досвід застосування азотних машин у різних галузях промисловості... ..	231

5.5.1. Принципова схема одержання газоподібного азоту методом мембранного та адсорбційного поділу повітря.....	232
5.5.2. Використовувані технології для одержання газоподібного азоту.....	233
5.5.3. Функціональний принцип одержання азоту мембранним та адсорбційним способами.....	233
5.5.4. Консервація та зберігання продуктів перероблення в харчовій промисловості.....	234
5.5.4.1. Ефективність застосування азоту при виробництві, упаковуванні та зберіганні харчових продуктів.....	234
5.5.4.2. Застосування газоподібного азоту на фрукто- та овочесховищах.....	234
5.5.4.3. Застосування газоподібного азоту для зберігання зернових культур	235
5.5.4.4. Застосування азоту в масложировій промисловості.....	236
5.5.4.5. Збільшення терміну зберігання продуктів.....	237
5.5.4.6. Упаковування продукції.....	238
5.5.4.6.1. Упаковування харчових продуктів у нейтральному середовищі...	238
5.5.4.6.2. Упаковування та зберігання м'ясних виробів.....	238
5.5.4.7. Устаткування і використовувані технології.....	240
5.5.5. Станції азотні переносні для різних галузей промисловості.....	246
5.5.6. Зберігання зернових у контрольованому нейтральному середовищі азоту.....	246
5.5.7. Заливання пропан-бутаном вагонів-цистерн.....	246
5.6. Системи охолодження та холодозабезпечення для устаткування і технологічних ліній.....	247
5.7. Системи утилізації і рекуперації тепла.....	248
5.8. Компресорна техніка в розвитку залізничного транспорту.....	250
5.8.1. Компресорна техніка для рухомого складу залізничного транспорту..	250
5.8.2. Компресори для гальмових систем рухомого складу залізничного транспорту.....	255
РОЗДІЛ 6. ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ.....	261
6.1. Комплексне вирішення проблем безпеки під час розроблення вуглеводневих родовищ із застосуванням компресорного устаткування.....	261
6.2. Економічна ефективність упровадження установок компресорних газоутилізаційних УКГ-5/8.....	275
6.3. Економічна ефективність станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП-15/0,7 У1.....	276
ВИСНОВКИ.....	277
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	284

ВСТУП

Науково-дослідний і конструкторсько-технологічний інститут компресорного машинобудування (ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш») та ТОВ «Міжнародний інститут компресорного і енергетичного машинобудування» (ТОВ «МІКЕМ») концерну «НІКМАС» разом з установами Національної академії наук України, вищими навчальними закладами, галузевими інститутами впродовж багатьох десятиріч займаються дослідженням та встановленням закономірностей зміни параметрів робочих процесів і розробленням методів розрахунку режимних та конструктивних параметрів компресорного устаткування, що забезпечують його ефективне використання, створенням і впровадженням компресорного устаткування та способів його застосування в різних галузях промисловості.

Так, оптимізація пневмоенергетичного комплексу шахт шляхом удосконалювання технології виробництва стисненого повітря і створення високоефективних підземних компресорних станцій заданої продуктивності для підвищення надійності пневмопостачання, збільшення темпів вуглевидобутку та економії енергоресурсів є актуальним завданням енергозбереження. Стиснене повітря є одним з основних видів використовуваної енергії в гірничорудній галузі – у шахтах і рудниках для привода добувних, бурильних, навантажувальних машин, у прохідницьких та інших пристроях. Він також є й найдорожчим видом енергії, використовуваним у сучасній гірничорудній галузі, що обумовлено відносно невисоким ККД компресорних машин, втратами стисненого повітря в пневмережах. Його використання як енергії пневмопривода машин коштує в 7–10 разів дорожче, ніж використання електропривода. Частка витрат електроенергії в собівартості видобутку зросла з 5 % у 1990 р. до 18–20 % на сьогодні. Питома вага пневмоенергії в енергобалансі гірничих підприємств із підземним способом видобутку становить 20–30 %.

На більшості підприємств гірничорудної галузі України використовується пневмоенергія, вироблена поршневыми, відцентровими і гвинтовими компресорами. Продуктивність окремих компресорів коливається від 5 до 500 м³/хв, а споживана потужність – від 40 до 2 000 кВт. На цей час кількість компресорів становить близько 2 000 шт. із загальною встановленою потужністю близько 700 тис. кВт. При цьому на окремих шахтах довжина розгалуженої пневмережі досягає 35–50 км. Установлені на поверхні шахт компресорні станції через велику довжину пневмереж не забезпечують підземних виробок стисненим повітрям необхідної якості. На цей час більше 80 % парку стаціонарних компресорних машин повністю виробили свій ресурс і перебувають в експлуатації більше 25–30 років. У зв'язку з цим проблема децентралізації пневмопостачання є важливою.

Актуальним є підвищення надійності та ефективності роботи компресорних установок в умовах вугільних шахт, включаючи тупикові виробки. Виникає потреба створення компресорних машин, в яких істотно поліпшується надійність роботи в складних умовах експлуатації. Важливим також є розроблення

способів застосування компресорних машин у технології видобутку та утилізації метану і запобігання підземним пожежам.

Існує необхідність у проведенні досліджень надійності компресорних машин і розробленні нових композиційних матеріалів та захисних покриттів деталей, вузлів компресорного устаткування. Необхідно також удосконалити методи розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок для підвищення їх надійності, довговічності, енергоефективності, а також методи розрахунку режимних і конструктивних параметрів компресорних установок, що працюють у складних умовах шахт.

Також актуальним завданням є підвищення безпеки проведення робіт, що стоїть перед розроблювачами нового компресорного обладнання і технологій його застосування під час розроблення родовищ природних вуглеводнів. Удосконалювання технологій, способів та засобів розроблення та експлуатації родовищ вуглеводнів є актуальною проблемою, що має важливе значення для вугільної і нафтогазової галузей.

Актуальними є питання створення енергоефективного компресорного устаткування і технологій термостатування аерокосмічних апаратів, утилізації та когенерації звалищного газу, створення вискоефективних технологій застосування азоту під час виробництва, упакування та зберігання харчових продуктів, компресорної техніки для рухомого складу залізничного транспорту та ін.

Вирішення цих питань дозволить розвинути науково-технічні основи розроблення і використання компресорного устаткування в різних галузях промисловості. Тому установлення закономірностей зміни параметрів робочих процесів теплообмінних апаратів компресорних установок, режимних параметрів їх роботи в умовах шахтних пневмереж, надійності вузлів і блоків компресорних машин, розроблення засобів підвищення їх надійності, довговічності та енергоефективності, методів розрахунку режимних та конструктивних параметрів компресорного устаткування і способів його застосування при видобутку нафти, газу, вугілля, шахтного метану, для підвищення ефективності та безпеки процесів в інших галузях промисловості та розвиток на цій базі науково-технічних основ створення енергоефективних компресорних машин нового покоління є актуальними науковими проблемами, що мають важливе значення для сталого розвитку України.

РОЗДІЛ 1

СТВОРЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНОГО КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

1.1. Фундаментальні розробки з удосконалення методів розрахунку режимних параметрів компресорних установок

1.1.1. Обґрунтування переходу від схеми централізованого повітропостачання шахт до локальних компресорних станцій

Проведемо оцінювання здатностей стисненого повітря виконати механічну роботу для випадку з віддаленою і локальною компресорними установками. Параметри повітря перед споживачами локальної мережі візьмемо такими, що дорівнюють V_1 , p_1 , T_1 , а для протяжної мережі – такими, що дорівнюють V_2 , p_2 , T_2 . При цьому

$$\begin{aligned}V_2 &= V_1 - \Delta V, \\p_2 &= p_1 - \Delta p, \\T_2 &= T_1 - \Delta T,\end{aligned}$$

де ΔV , Δp , ΔT – втрати продуктивності, тиску, охолодження повітря в мережі між віддаленими компресорами і споживачем.

Теоретична механічна робота, здійснювана m кг стисненого повітря при адіабатному розширенні його до кінцевого тиску p (у нашому випадку до атмосферного p_a) у пневмопристрої або інструменті дорівнює

$$L = \frac{mkRT_0}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{(k-1/k)} \right],$$

де $m = PV$ – масова витрата повітря; $k = 1,4$ – показник адіабати.

Підставивши в цей вираз замість m , T , p їх значення для стану 1 (на виході з компресора) і 2 (на вході до споживачів), одержимо можливість порівняти величини теоретичної механічної роботи з урахуванням і без урахування втрат енергії маси повітря у трубопроводі.

Як приклад розглянемо пневмосистему, в якій втрати на витікання повітря становлять 10 %, гідравлічний опір – $0,5 \text{ кг/см}^2$, охолодження повітря відбувається на $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Параметри повітря на нагнітанні, компресора: $p_1 = 8 \text{ кг/см}^2$, $t_1 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначимо коефіцієнт недовикористання стисненого повітря, застосовуючи вищенаведені співвідношення:

$$K_L = \frac{L_2}{L_1} = \frac{T_2}{(1 - \Delta m/m_1)T_1} \cdot \frac{\left[1 - (1/7,5)^{0,286} \right]}{\left[1 - (1/8)^{0,286} \right]} = 0,76,$$

зокрема, за рахунок втрат енергії і витоків у повітропроводі здатність повітря здійснювати механічну роботу знижується на 24 %. Можлива й інша інтерпретація цього результату. Якщо, незважаючи на втрати, споживачеві для нормальної роботи достатні параметри повітря, то, встановивши локальний компресор, розрахований на ці параметри, можна заощадити близько 24 % споживаної

енергії. У реальних системах економія від використання локальних систем може бути набагато більшою. Наприклад, якщо втрати повітря в системі збільшаться удвічі (до 20 %), то за інших рівних умов економія енергії становитиме вже 33 %. Очевидно, що економічні переваги локальних систем не викликають сумніву.

Уперше встановлено закономірності зміни коефіцієнта недовикористання стисненого повітря, обумовленого співвідношенням механічної роботи, здійсненої стисненим повітрям при адіабатному розширенні його до кінцевого тиску, при локальному і централізованому повітропостачанні шахт із використанням гвинтових компресорних станцій. Ефективність переходу від схеми централізованого повітропостачання шахт до локальних компресорних станцій характеризується коефіцієнтом недовикористання стисненого повітря, що визначається співвідношенням механічної роботи, здійсненої стисненим повітрям при адіабатному розширенні його до кінцевого тиску при локальному і централізованому повітропостачанні шахт. Так, при втратах на витікання повітря в пневмосистемі 10 % та гідравлічному опорі $0,5 \text{ кг/см}^2$ при використанні локальних гвинтових компресорних станцій із тиском нагнітання 8 кг/см^2 і за температури повітря $60 \text{ }^\circ\text{C}$ збільшення втрат повітря в системі удвічі – до 20 %, приводять до економії енергії до 33 %.

1.1.2. Вдосконалені методи і способи регулювання компресорів

1.1.2.1. Регулювання поршневих компресорів

Розглянемо найпростішу систему прямого регулювання поршневого компресора, що працює на мережу (рис. 1.1 а). Завдання регулювання – підтримка заданого тиску в ресивері при зміні витрати споживання. Такі системи називаються системами стабілізації. Принцип дії системи регулювання полягає в такому (рис. 1.1 а).

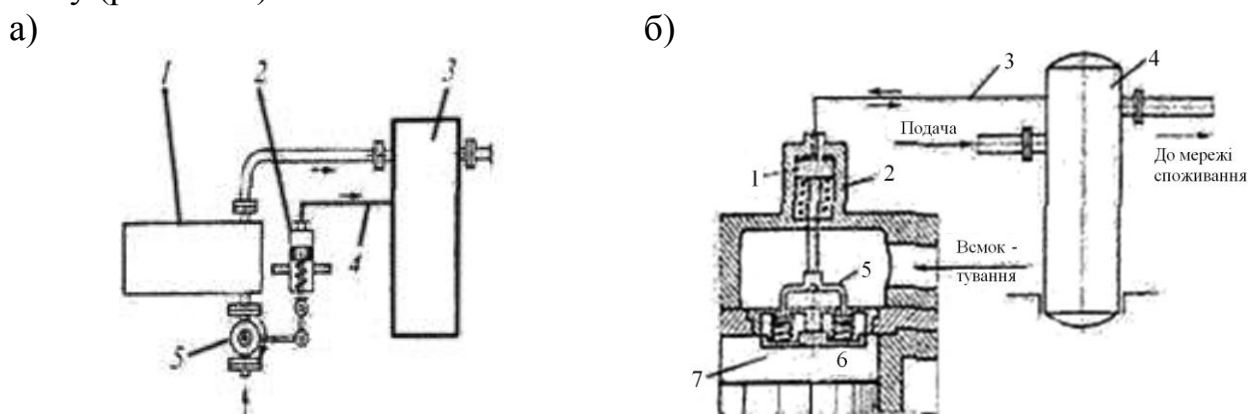


Рисунок 1.1 – Схеми регулювання подачі поршневого компресора:

- а) дроселюванням газу при всмоктуванні: 1 – компресор; 2 – поршневий механізм регулятора; 3 – ресивер; 4 – імпульсна трубка; 5 – дросельна заслінка;
- б) відтисканням пластини всмоктувального клапана; 1, 6 – поршні; 2 – поршневий механізм регулятора з пружиною; 3 – імпульсна трубка; 4 – ресивер (балон); 5 – вилка штока; 7 – всмоктувальний клапан

У разі зменшення витрати газу з ресивера 3 при граничній подачі компресора 1 зростаючий тиск у ресивері передається по імпульсній трубці 4 у порожнину поршневого механізму 2 регулятора і впливає на поршень, що, стискаючи пружину регулятора, прикриває дросельну заслінку 5 на всмоктуванні. подача компресора при цьому зменшується до величини витрати газу з ресивера (точка 3 на рис. 1.2).

У випадку зниження тиску в ресивері, що свідчить про збільшення витрати повітря споживачами, дросельна заслінка відкривається, і система переходить у рівноважний стан, що відповідає точці 5.

Для регулювання продуктивності поршневих компресорів застосовують способи і пристрої, що базуються на впливі на робочі органи компресора шляхом зміни їх геометричних характеристик. Серед них найпоширеніші – вплив на клапани циліндра і приєднання додаткових порожнин до циліндра.

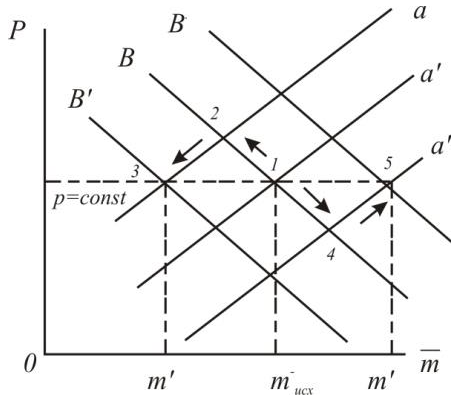


Рисунок 1.2 – Схема зміщення характеристик компресора за допомогою регулятора: a, a', a'' – характеристики мережі; B, B', B'' – характеристики компресора

За першим способом продуктивність змінюється частковим або повним поверненням повітря з робочої порожнини циліндра в усмоктувальний тракт. Це досягається за допомогою спеціального відтискного пристрою (рис. 1.1 б), що утримує пластини всмоктувального клапана в частково або повністю відкритому стані. При цьому у фазі нагнітання стиснене повітря перепускається

через відкриті клапани на всмоктування, а на нагнітання надходить або частина повітря, або не надходить зовсім. Відтискання клапана здійснюється оператором ззовні відповідно до потреби мережі. Клапани втримуються у відкритому

стані при зворотному ході поршня лише частково. Стиснення починається після того, як на деякій частині прямого ходу поршня всмоктувальні клапани закриваються. Шляхом зміни тривалості періоду затримки закриття клапанів здійснюється плавне й економічне регулювання. Затрачувана робота стиснення зменшується приблизно пропорційно продуктивності.

На практиці застосовують приводні синхронні електродвигуни, що дозволяють ступенево змінювати частоту обертання вала. З огляду на прямо пропорційну залежність продуктивності від частоти обертання вала n характеристику компресора одержують перенесенням вихідної характеристики еквідистантно вліво уздовж осі продуктивності V до значення V' , обумовленого співвідношенням

$$\frac{V'}{V_0} = \frac{n'}{n_0},$$

де індексом «0» позначені параметри вихідного стану, а штрихом – параметри зміненого стану. У деяких випадках використовують комбінації розгля-

нутих вище способів – комбіноване регулювання.

1.1.2.2. Регулювання гвинтових компресорів

Ефективність роботи гвинтових компресорів у режимах змінного споживання повітря залежить від економічності прийнятого способу регулювання.

Принципово можливі кілька способів регулювання продуктивності:

1) байпасування (перепускання) з нагнітання на всмоктування або скидання частини стисненого повітря; 2) зміна частоти обертання; 3) дроселювання на всмоктуванні; 4) зміна об'єму робочих порожнин за допомогою золотникових пристроїв; 5) переведення компресора на режим холостого ходу; 6) періодичний пуск і зупинення компресора.

Порівняльна економічність деяких способів за результатами випробувань маслозаповнених гвинтових компресорів наведена на рис. 1.3. Зі способів, що забезпечують безперервний процес регулювання (1–4), байпасування повинне бути відкинуте, що не приводить до зниження споживаної потужності, а зміна частоти обертання вимагає складних і дорогих пристроїв.

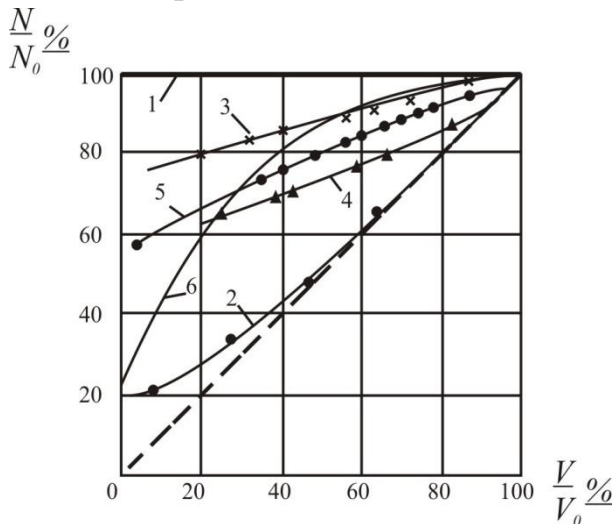


Рисунок 1.3 – Характеристики регулювання гвинтових компресорів різними способами: 1 – байпасування; 2 – зміна частоти обертання; 3 – дроселювання; 4 – зміна об'єму за допомогою золотникових пристроїв; 5 – дроселювання на всмоктуванні компресора; 6 – пуск – зупинення

продуктивності до нуля потужність зменшується лише на 25–30 %. Це відбувається тому, що при дроселюванні на всмоктуванні у вхідній порожнині компресора утворюється розрідження, і ступінь стиску зростає. Водночас зростають внутрішні перетікання в радіальних і торцевих зазорах гвинтових пар, і питома потужність стиску підвищується.

Застосування золотникових пристроїв є способом впливу на робочі органи компресора. Суть його полягає в тому, що з боку всмоктування в простір між провідними і веденим гвинтами вводиться золотник (рис. 1.4), чим досягається вимкнення частини робочого об'єму, що приводить до зменшення подачі компресора.

Застосування золотникового пристрою ускладнює і здорожує конструкцію компресора, а економічність такого

регулювання займає проміжне місце між найбільш ефективним способом – зміною частоти обертання – та іншими відомими способами.

Цілком прийнятним є регулювання дроселюванням на всмоктуванні. Однак глибоке регулювання таким способом не досить економічне, тому що при зміні

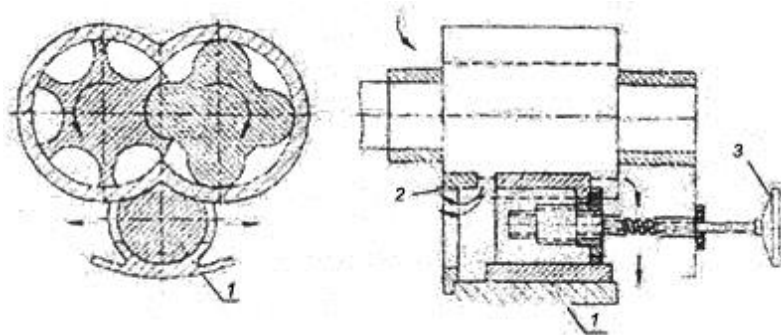


Рисунок 1.4 – Гвинтовий компресор із золотниковим регулюванням:
1 – золотник; 2 – стопор; 3 – механізм привода

Більш досконалі профілі гвинтів із дуже малими зазорами (0,02–0,03 мм) дозволяють одержати зниження потужності при глибокому дроселюванні до 40–50 % (рис. 1.3, крива 5).

1.1.2.2.1. Система регулювання холостого ходу шахтних компресорів

Розроблено систему регулювання холостого ходу шахтних компресорів. Елементи регулювання представлені на спрощеній пневмогидравлічній схемі установки (рис. 1.5).

Регулювання відбувається за рахунок дроселювання повітря на всмоктуванні. Із цією метою на входному патрубку компресора 1 установлений затвор дисковий 9, робочий орган якого повертається за допомогою приєднаного пневмодвигуна 10. Номінальна продуктивність компресора (25, 32 або 50 м³/хв) виставляється вручну при заводських випробуваннях за допомогою встановленого на затворі маховика зі шкалою і фіксується контргайкою.

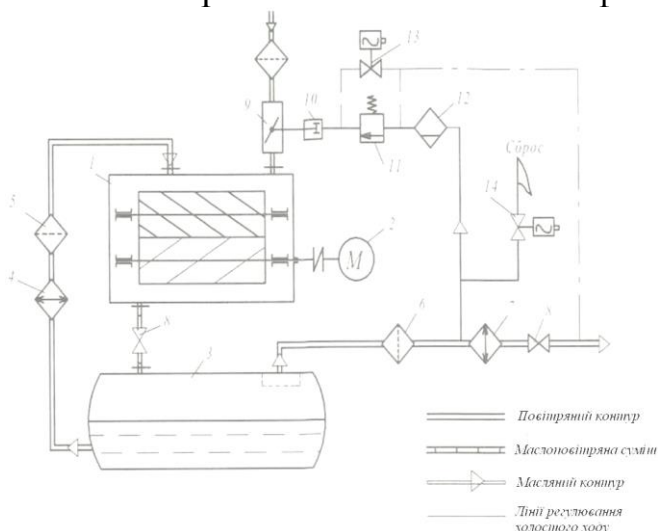


Рисунок 1.5 – Схема системи регулювання холостого ходу гвинтової компресорної установки:

1 – гвинтовий компресор; 2 – приводний електродвигун; 3 – бак-масловіддільник; 4 – маслоохолоджувач; 5 – фільтр масляний; 6 – повітряний фільтр-масловіддільник; 7 – кінцевий повітроохолоджувач; 8 – зворотні клапани. Елементи системи регулювання холостого ходу; 9 – затвор дисковий; 10 – пневмодвигун; 11 – регулятор продуктивності; 12 – вологовіддільник; 13, 14 – клапани з електромагнітним приводом

Зі скороченням потреби в стисненому повітрі починає зростати тиск повітря, що нагнітається, і при досягненні величини $8,1 \text{ кгс/см}^2$ стиснене командне повітря, пройшовши через вологовіддільник 12, впливає на підпружинену діафрагму регулятора продуктивності 11, відтискає її від сідла, і стиснене повітря надходить до поворотного пневмодвигуна, тисне на його поршень, і затвор дисковий закривається.

Якщо відбувається подальше підвищення тиску нагнітання до $8,4 \text{ кгс/см}^2$, затвор дисковий повністю закривається, компресор переходить у режим холостого ходу.

Затвор дисковий і сам компресор за своєю конструкцією не є герметичними, незначна кількість повітря продовжує надходити на всмоктування й стискається в компресорі із забезпеченням умов змащення та охолодження.

При поновленні потреби в стисненому повітрі тиск нагнітання починає знижуватися і за величини 8 кгс/см^2 регулятор продуктивності закривається, зменшується тиск на поршень поворотного пневмодвигуна, дисковий затвор відкривається, збільшуючи продуктивність компресора.

Переведення установки на режим холостого ходу, з одного боку, розвантажує приводний електродвигун, а з іншого боку, створює для гвинтового компресора більш складні умови роботи. Останнє спричинене підвищенням температурного стану компресора через припинення надходження повітря до проточної частини. Обертання гвинтів відбувається в замкненому не вентильованому просторі у в'язкому маслоповітряному середовищі з нагріванням від тертя. У цих умовах розігрівання компресора до гранично припустимої температури відбувається за кілька секунд, після цього компресор необхідно перемкнути на робочий режим або зупинити. Щоб збільшити час роботи на холостому ходу, необхідно забезпечити проходження свіжого повітря через компресор кількістю 10–15 % від номінального. Із цією метою виконують свердління в диску дросельної заслінки, а на лінії нагнітання встановлюють електромагнітний клапан 14, що повинен спрацьовувати на скидання повітря в атмосферу одночасно із закриттям дросельної заслінки.

Схема передбачає також переведення компресора в режим холостого ходу повітря вручну. При цьому натисканням кнопки «Пуск холостого ходу» одночасно відкриваються електромагнітні клапани 13 і 14. Така необхідність може виникнути в позаштатних ситуаціях, які можуть спричинити аварію, що критично для вугільних шахт, а також за відмови регулятора продуктивності.

У разі якщо за умовами експлуатації необхідно змінити настроювання на максимально припустимий тиск ($8,2 \text{ кгс/см}^2$), вхідний штуцер електромагнітного клапана 13 приєднується до мережі споживача (за межами установки через електростандартний манометр), як це показано штрихпунктиром на рис. 1.5.

1.1.2.2.2. Регулювання шляхом переведення компресора на холостий хід

Гвинтові компресори ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» оснащені системою регулювання, що забезпечує зміну продуктивності компресора від 10 до 100 % шляхом автоматичного переведення компресора на холостий хід. Цей спосіб є ступеневим регулюванням. Розглянемо більш детально процес регулювання, звернувшись до схематичного зображення процесів на рис. 1.6.

Якщо в даний момент часу дросельна засувка на всмоктуванні в компресор закрита (що відповідає режиму холостого ходу), то через якийсь час тиск у мережі стисненого повітря знизиться до мінімально припустимого значення p_{min} , і регулятор продуктивності подасть імпульс на пневмопривід, що, у свою чергу, відкриє заслінку на всмоктуванні. Тиск у мережі почне зростати, оскільки продуктивність компресора трохи більша від споживання стисненого повітря. Це відповідає процесу 1–2 на рис. 1.6 а.

Через проміжок часу Δt_n настане момент, коли тиск нагнітання досягне максимально припустимої величини p_{max} , і регулятор продуктивності подасть імпульс на закриття дросельної засувки – перехід на режим холостого ходу (процеси 2–3), що триває упродовж часу $\Delta t_{x.x}$. Унаслідок розбирання повітря споживачами тиск знижується до p_{min} , і далі ці процеси повторюються. Таким чином, робота гвинтового компресора – це чергування процесів нагнітання і холостого ходу. Тривалість цих процесів та їх частота залежать від співвідношень продуктивності компресора і витрати споживачами, а також від характеристики мережі (ємність, інерційність).

Тривалість роботи установки на холостому ходу обмежується припустимим нагріванням компресора внаслідок малої витрати повітря. Звичайно беруть $\Delta t_{x.x} < 15$ хв

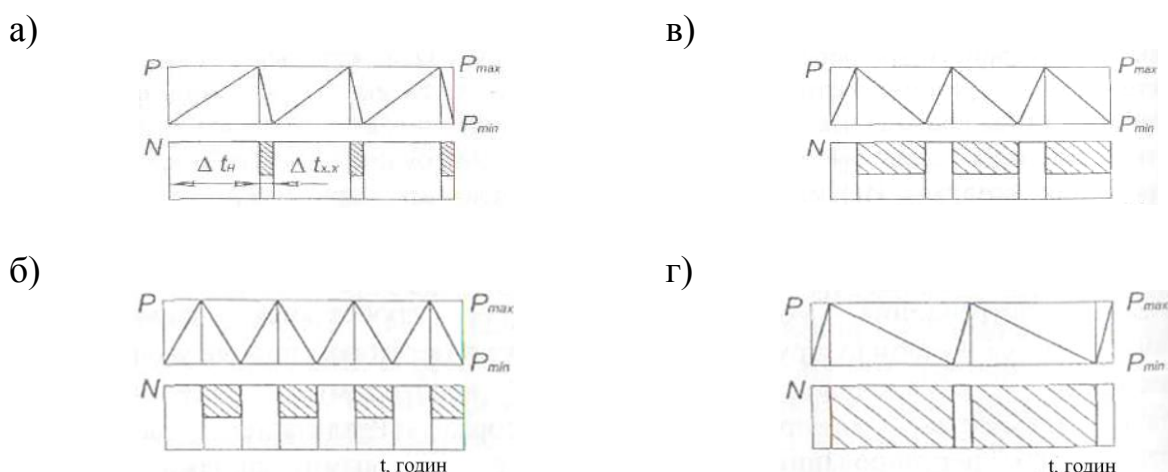


Рисунок 1.6 – Графіки роботи гвинтового компресора, регульованого переходом на холостий хід за різних рівнів споживання стисненого повітря: а) режим, близький до номінального; б) режим середнього споживання; в) режим малого споживання; г) регулювання вимкненням компресора

Якщо мережа складається з ресиверів, колекторів і численних повітропроводів, то ємність та інерційність її великі і процеси накачування та скидання тиску відбуваються повільно. Якщо ємність мережі мала, то при такому самому співвідношенні виробітку і споживання стисненого повітря процеси будуть чергуватися з більшою частотою. У разі якщо споживач з'єднаний безпосередньо з компресором, то частота циклів буде найбільшою.

Нижче наведений наближений теоретичний аналіз цього способу регулювання. Розглянемо спрощену схему «компресор – мережа». Ця система є динамічним об'єктом, характеристики якого визначаються властивостями і параметрами мережі. Вважаємо заданими зведені до нормальних умов p_0 і t_0 , номінальну продуктивність компресора V_k і поточне споживання повітря V_n , ємність ресивера Q . У цьому випадку ємність ресивера – узагальнене поняття. Це ємність власне ресивера, якщо такий є, і сумарна ємність повітряного нагнітального колектора, продувних ємностей, масловодовіддільників, повітропроводів та ін. Припустимий діапазон роботи тиску в мережі від p_{min} до p_{max} . Визначимо часові інтервали роботи компресів у режимі нагнітання Δt_n і холостого ходу $\Delta t_{x.x}$. Очевидно, що задача має сенс лише за дотримання умови $V_k > V_n$.

Нехай у деякий момент часу $t = t_0$ тиск у ресивері дорівнює мінімально припустимому $p_1 = p_{min}$, і компресор включається в роботу на нагнітання. У цей момент у ресивері масова частка повітря дорівнює

$$M_1 = \rho_1 Q, \quad (1.1)$$

де $\rho_1 = \frac{p_1}{zRT_1}$ – густина повітря; z – коефіцієнт стискальності.

Одночасно з нагнітанням повітря в ресивер відбувається його відбір до споживача. Через умови $V_k > V_n$ тиск у ресивері буде поступово підвищуватися, і в деякий момент часу $t = t_1 + \Delta t_n$ він досягне максимально припустимої величини $p_2 = p_{max}$. Масова кількість повітря в ресивері буде дорівнювати

$$M_2 = \rho_2 Q, \quad (1.2)$$

де $\rho_2 = \frac{p_2}{zRT_2}$.

Маса повітря в ресивері збільшилася на величину

$$\Delta M = M_2 - M_1 = (\rho_2 - \rho_1) Q. \quad (1.3)$$

Це збільшення відбулося за рахунок перевищення виробництва повітря над споживанням за період Δt_n

$$\Delta M = (m_k - m_n) \Delta t_n, \quad (1.4)$$

де m_k і m_n – масові витрати через компресор та споживане повітря.

Для спрощення подальших викладень беремо температуру повітря в ресивері такою, що постійно дорівнює T_0 . З рівнянь (1.3) і (1.4), виконавши необхідні підстановки і перетворення, одержимо тривалість роботи в режимі нагнітання

$$\Delta t_n = \frac{Q}{zRT_0\rho_0} \frac{p_2 - p_1}{V_k - V_n}, \quad (1.5)$$

яка, мабуть, тим більша, чим ближчі за величиною продуктивності V_k і V_n .

До моменту досягнення максимального тиску і перемикавання компресора на холостий хід у ресивері накопичилося $M_2 = \rho_2 Q$ повітря. Частина цього повітря Δm буде витрачена в режимі споживання (без підкачування) за період часу, що дорівнює

$$\Delta t_{x.x} = \frac{Q}{zRT_0\rho_0} \frac{p_2 - p_1}{V_n}. \quad (1.6)$$

Очевидно, що тривалість роботи в режимі холостого ходу тим більша, чим більший об'єм ресивера і менше споживання V_n .

З огляду на те що $zRT_0\rho_0 = p_0$, то $p_1/p_0 = \varepsilon_1$, $p_2/p_0 = \varepsilon_2$, $q_v = V_n/V_k$ (1.5) і (1.6) перетворяться до вигляду

$$\Delta t_n = \frac{Q}{V_k} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{1 - q_v}, \quad (1.5')$$

$$\Delta t_{x.x} = \frac{Q}{V_k} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{q_v}. \quad (1.6')$$

У цих формулах $q_v = V_n/V_k$ є параметром відносного споживання повітря.

Тривалість одного циклу «нагнітання – холостий хід» становить

$$\Delta t_{\text{ц}} = \Delta t_n + \Delta t_{x.x} = \frac{Q}{V_k} \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{q_v(1 - q_v)}. \quad (1.7)$$

Комплекс $\frac{Q}{V_k}(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ є постійним для кожного розглянутого випадку регулювання. Розділивши на цей комплекс обидві частини рівностей (1.5'), (1.6') і (1.7), одержимо прості вирази:

$$\Delta \bar{t}_n = \frac{1}{1 - q_v}, \quad (1.8)$$

$$\Delta \bar{t}_{x.x} = \frac{1}{q_v}, \quad (1.9)$$

$$\Delta \bar{t}_{\text{ц}} = \frac{1}{q_v(1 - q_v)}. \quad (1.10)$$

Ці безрозмірні залежності є універсальними характеристиками розглянутого способу регулювання гвинтового компресора. Їх графічні зображення у відносних координатах, наведені на рис. 1.7, придатні для будь-яких сполучень продуктивності компресора і величини споживання, об'єму ресивера і діапазону припустимої зміни тиску в мережі нагнітання.

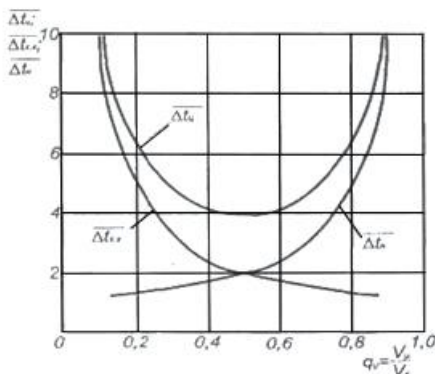


Рисунок 1.7 – Тривалість циклу, інтервалів нагнітання і холостого ходу, віднесені до величини $\frac{Q(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}{V_k}$ залежно від навантаження q_v

Усі ці криві симетричні щодо ординати $q_v = 0,5$. Тривалість циклу Δt_u мінімальна за $q_v = 0,5$, тобто коли $V_n = 0,5V_k$. При $q_v > 0,5$ час холостого ходу менший від часу нагнітання, а за $q_v < 0,5$ – навпаки. Практичне значення мають праві області характеристик при $q_v > 0,5$, для яких $\Delta t_u \geq 2$, $\Delta t_{x.x} \geq 2$ і $\Delta t_y \geq 2$.

Розглядаючи графіки на рис. 1.7, необхідно мати на увазі, що через спрощеність розрахункової моделі значення характеристик в околах точок $q = 0$ і 1 умовні: при $q \rightarrow 0$ $\Delta t_{x.x} \rightarrow \infty$, тобто компресор не працює на нагнітання, а при $q \rightarrow 1$ $\Delta t_u \rightarrow \infty$, тобто компресор постійно працює у номінальному режимі.

Із графіків випливає, що при продуктивності компресора $50 \text{ м}^3/\text{хв}$, об'ємі ресивера 50 м^3 , діапазоні зміни тиску в ресивері від 6 до 8 кгс/см², при відносному споживанні $q_v = 0,8$ тривалість інтервалів роботи на холостому ходу становить 2,5 хв, інтервалів нагнітання – 10 хв, що відповідає приблизно п'яти перемиканням компресора за 1 годину. Зазначимо, що абсолютні величини інтервалів прямо пропорційні об'єму ресивера і обернено пропорційні продуктивності компресора.

За допомогою залежності (1.7) для визначення тривалості циклу «нагнітання – холостий хід» можна, знаючи характеристики мережі Q й $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$, визначити частоту спрацьовування системи регулювання залежно від режиму споживання q_v :

$$Z = \frac{V_k q_v (1 - q_v)}{Q \varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \text{ цикл/хв.} \quad (1.11)$$

Ця величина прямо пов'язана з надійністю та ресурсом системи регулювання і, мабуть, повинна бути як можна меншою. Із цієї позиції варто рекомендувати збільшення ємності системи за рахунок, наприклад, установки ресиверів або колекторів великого діаметра. Не варто також надмірно звужувати припустимий діапазон зміни тиску на нагнітання, тобто величину $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$. На рисунку 1.8 наведений узагальнений графік для визначення частоти спрацьовування системи залежно від параметра споживання за різних характеристик мережі. Цей графік потрібний під час проектування пневмомережі, при вирішенні питання про необхідність використання ресиверів.

Під час настроювання системи регулювання за мінімальний тиск беруть мінімально припустиму величину тиску, за якого можлива нормальна робота устаткування. Максимальний тиск береться не вище від величини, що допускається, за умовами міцності та герметичності мережі або таким, що дорівнює тиску нагнітання компресора. При виборі верхньої межі тиску варто враховувати два фактори: чим більший тиск, тим менша частота циклів регулювання, але більша споживана установкою потужність.

Із попереднього аналізу випливає, що необхідні умови для нормального функціонування системи регулювання задаються системою нерівностей

$$\left. \begin{aligned} q_v &> 1, \\ \varepsilon_{\min} &\leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\max}, \\ Z &\geq Z_{\max}. \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Графічна інтерпретація поля припустимих значень параметрів системи подана на рис. 1.9. Виходячи з конкретних умов, можуть бути накладені додаткові обмеження. Наприклад, із метою недопущення перегрівання компресорного блока на режимі холостого ходу варто взяти $q_v \geq q_{vmin}$.

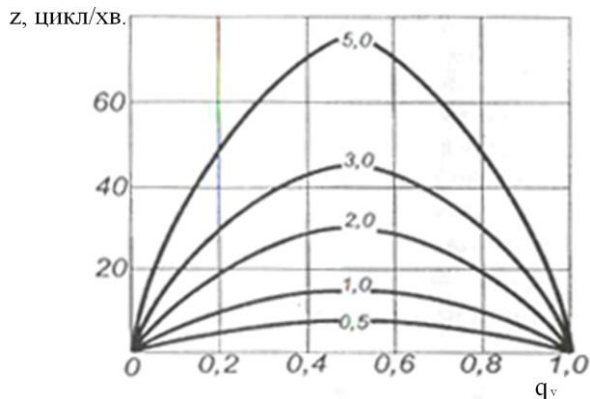


Рисунок 1.8 – Залежність частоти спрацьовування системи регулювання від параметра витрати для різних значень параметра $V_k / Q(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ хв^{-1}

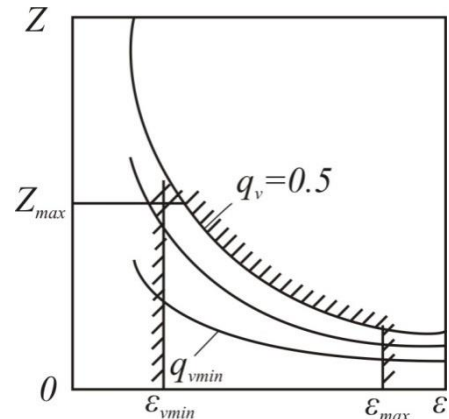


Рисунок 1.9 – Поле припустимих значень параметрів системи регулювання ε і Z

Проведений теоретичний аналіз справедливий для стаціонарних або режимів, що повільно змінюються. Не заглиблюючись в теорію автоматичного регулювання динамічних систем, обмежимося основними спрощеними положеннями. Реальна система регулювання гвинтового компресора (у цьому випадку пневматична) містить ряд зв'язаних між собою за допомогою імпульсних ліній елементів: пневмодатчик, пневморегулятор, пневмодвигун, а також регулювальний орган – дросельну заслінку. Будь-яка механічна система, що складається із золотників, поршнів, дроселів, не може спрацьовувати миттєво, а має інерційність, що характеризується максимальною швидкістю спрацьовування системи w_{max} – мінімальним проміжком часу від початку імпульсу до переміщення заслінки в закритий стан. Крім того, величина збільшення імпульсу (тобто величина зміни тиску в ресивері) повинна бути такою, щоб перебороти сили інерції й тертя в елементах системи. Ця особливість характеризується порогом чутливості системи: мінімальною величиною збільшення параметра споживання $\pm \Delta q_v$.

Необхідно зазначити, що відповідно до розглянутої схеми навіть невеликі коливання тиску будуть викликати спрацьовування системи регулювання. Однак така ситуація характерна лише за відсутності мережі, тобто коли споживач максимально наближений до компресора. На практиці між ними завжди є мережа з повітропроводами, ресиверами, дросельними елементами і т. п., які демпфують, згладжують коливання тиску, що позитивно позначається на роботі системи регулювання.

Важливим підсумком є доповнення основних статичних характеристик мережі Q та $(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ параметрами, що визначають динамічне поведіння мережі при змінних режимах, а саме: порогом чутливості регулятора Δq_v й макси-

мальною швидкістю зміни споживання w_{max} . У загальному випадку при змінних режимах роботи регульовальними характеристиками є функції:

$$\Delta t_u, \Delta t_{x.x}, \Delta t_y = F(V_k, Q, \varepsilon_2 - \varepsilon_1, q_v, \Delta q_v),$$

що мають фізичний сенс за $w < w_{max}$.

Таким чином, реальні системи регулювання згладжують та осереднюють у часі імпульси, що постійно надходять, не реагуючи на малі та швидкоминуці збурювання. Усе вищезазначене рівною однаковою мірою належить до різних систем автоматичного регулювання компресорів будь-яких типів.

Застосування гвинтових компресорів, обладнаних системами переривчастого (циклічного) регулювання, шляхом перемикання на холостий хід висуває певні вимоги перед характеристиками мережі споживача.

Основною характеристикою мережі є її об'єм, що складається з об'ємів ресиверів, колекторів, повітропроводів, сепараторів, осушувачів. Як впливає з формули (1.8), тривалість циклів «нагнітання – холостий хід», а отже, й частота спрацьовування регульовальної пневмосистеми прямо пропорційно залежать від об'єму мережі. При великому об'ємі мережі наповнення її повітрям відбувається упродовж тривалого періоду, але частота циклів мала. При малому об'ємі мережі частота збільшується і негативно позначається на надійності пневмоприладів системи. При дуже малому об'ємі мережі швидкість спрацьовування пневмоприладів може виявитися нижчою від необхідної, і система буде непрацездатною. Мінімально припустимий об'єм системи визначається з формули (1.7):

$$Q_{min} = \frac{V_k q_v (1 - q_v)}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \Delta t_{ymin}. \quad (1.13)$$

З універсальних регульовальних характеристик впливає, що найгіршим режимом, коли Δt_y мінімальне, є режим споживання $\Delta q_v = 0,5$. Саме для цього випадку потрібно обчислювати мінімально припустимий об'єм мережі.

Мінімальне значення Δt_{ymin} визначається швидкістю спрацьовування пневмосистеми «регулятор продуктивності – пневмодвигун – дискова заслінка». Залежно від продуктивності компресора (відповідно до розмірів диска, ходу штока двигуна та ін.) ця величина може бути взята такою, що дорівнює 1,5–2,5 секунди. Рекомендований діапазон припустимої зміни тиску $\varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 0,2-2$. Після підстановки цих величин у формулу (1.13) одержимо залежність, наведену в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Залежність мінімального об'єму мережі від продуктивності гвинтового компресора

$V_k, \text{ м}^3/\text{хв}$	2	5	10	25	50
$Q, \text{ м}^3$	0,025	0,0625	0,125	0,3125	0,625

Уперше встановлено закономірності зміни припустимого об'єму шахтної пневмомережі при застосуванні гвинтових компресорів, обладнаних системами циклічного регулювання, шляхом перемикання на холостий хід від продуктив-

ності компресора, тривалості циклу «нагнітання – холостий хід», відносного споживання повітря і припустимої зміни тиску в мережі. Мінімально припустимий об'єм шахтної пневмомережі пропорційний продуктивності компресора, тривалості циклу «нагнітання – холостий хід», відносному споживанню повітря і обернено пропорційний припустимій зміні тиску в мережі, при цьому при зміні тривалості циклу, обумовленої швидкістю спрацьовування пневмосистеми «регулятор продуктивності – пневмодвигун – дискова заслінка», у діапазоні 1,5–2,5 с та діапазоні припустимої зміни тиску віднесеного до початкового, що дорівнює 0,6, зі збільшенням продуктивності компресора з 2 до 50 м³/хв мінімальний об'єм шахтної мережі лінійно зростає з 0,025 до 0,625 м³.

Істотною характеристикою мережі є величина втрат повітря в мережі на ділянці між компресором і споживачем. Нормативна величина втрат повітря із системи (витікання) становить не більше 10 %, однак на практиці витіки досягають 20–30 % і більше, тому необхідно враховувати їх вплив на характеристики системи «компресор – мережа».

Розрахункова модель «компресор – мережа» дозволяє легко враховувати вплив витікань повітря із системи на характеристики компресора. Всі вищенаведені викладення залишаються незмінними. Але при заданні параметра q_v необхідно до витрати повітря споживачами додавати величину витікання, тобто

$$q'_v = \frac{V_n - V_{ym}}{V_n}. \quad (1.14)$$

Якщо виразити величину витікання в частках від споживання $V_{ym} = k_{ym}V_n$, де k_{ym} – коефіцієнт витікання, то вираз (1.14) набере вигляду

$$q'_v = q_v(1 + k_{ym}). \quad (1.14')$$

Із виразів (1.11, 1.14') випливає, що зі збільшенням витікання частота циклів знижується, а затрачувана потужність циклу підвищується.

При різкому зниженні тиску в мережі, викликаному обривом колектора або виходом повітря в атмосферу, компресор не може розвинути необхідного тиску нагнітання, тому при регулюванні підтримання тиску в системі в заданому діапазоні втрачає сенс. Таку ситуацію варто розглядати як аварійну.

1.1.2.2.3. Ефективність регулювання переходом на холостий хід

Як бачимо з графіків (рис. 1.6 а), при споживанні стисненого повітря, близького до номінальної продуктивності компресора (трохи меншого), перехід компресора на холостий хід (або вимкнення двигуна) відбувається рідко і на короткий час. Економія електроенергії при цьому невелика, і на даному режимі доцільніше, в принципі, скидати невеликі кількості повітря, ніж здійснювати перехід на холостий хід, виробляючи ресурс елементів системи регулювання. При середніх навантаженнях (рис. 1.6 б) тривалість інтервалів роботи під навантаженням і на холостому ходу (або зупиненні) порівнянна, економія істотна і збільшується зі зниженням споживання до незначного (рис. 1.6 в).

Досвід показує, що для гвинтових установок малої потужності (до

100 кВт) при незначній витраті повітря економічно більш доцільно робити періодичні вимкнення компресора (рис. 1.6 г). При цьому, однак, кількість циклів «пуск – зупинення» лімітується ресурсом установки. Звичайно, кількість циклів обмежують до 4–8 за 1 годину. Чим більша потужність приводного двигуна, тим менша допускається частота ввімкнень.

Визначимо економію електроенергії при регулюванні перемиканням на холостий хід порівняно, наприклад, із байпасуванням або скиданням зайвого повітря в атмосферу. При байпасуванні споживана компресором потужність не змінюється $N_n = const$. При переході на холостий хід потужність, споживана за один цикл «нагнітання + холостий хід», дорівнює

$$N_u = \frac{1}{\Delta t_u} (N_n \Delta \bar{t}_n + N_{x.x} \Delta \bar{t}_{x.x}). \quad (1.15)$$

Як зазначалося вище, для сучасних гвинтових компресорів $N_{x.x} = kN_n$ де $k = 0,5-0,6$. З урахуванням виразів (1.4)–(1.6) відносно економію енергії можна записати у вигляді

$$\Delta \bar{N} = \frac{N_n - N_u}{N_n} = (1-k)(1-q_v). \quad (1.16)$$

Як відомо, споживана потужність у фазі нагнітання постійна і дорівнює номінальній. Насправді, при зростанні тиску в мережі від p_{min} до p_{max} потужність, затрачувана на стиск повітря в компресорі, зростає пропорційно тиску від $N(p_{min})$ до $N(p_{max})$. Середня за інтервал Δt_n потужність дорівнює $N_{ср} = \frac{1}{2} [N(p_{min}) + N(p_{max})]$. Оскільки $N_{ср} < N_n$, то має місце додаткова економія енергії. Подамо $N_{ср} = mN_n$ ($m < 1$), тоді з виразу (1.16) для відносної економії енергії при використанні системи холостого ходу одержимо уточнений вираз

$$\Delta \bar{N} = 1 - mq_v - k(1 - q_v). \quad (1.16')$$

Коефіцієнт m можна визначити з умови пропорційності споживаної потужності тиску нагнітання

$$m = \frac{1}{1} \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right). \quad (1.17)$$

Як впливає з виразу (1.16), за цикл «нагнітання – холостий хід» потужність дорівнює

$$N_u = N_n [q_v + k(1 - q_v)]. \quad (1.18)$$

Відзначимо, що осереднена споживана потужність циклу не залежить ні від ємності, ні від характеристики мережі, а залежить лише від рівня споживання повітря. Взявши приблизно $k = 0,5$, одержимо остаточно

$$N_u = \frac{1}{2} N_n (1 - q_v). \quad (1.18')$$

Витрати потужності, кВт·год, визначаються множенням величини N_u на тривалість роботи в годинах. Добові витрати енергії визначаються підсумову-

ванням за ділянками добутків $N_{ui}\Delta\tau_i$, де $\Delta\tau_i$ – тривалість ділянки в годинах

$$W = \sum_{i=1}^6 N_{ui}\Delta\tau_i, \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

1.1.2.2.4. Закономірності зміни енергетичних характеристик регулювання гвинтового компресора в режимі холостого ходу

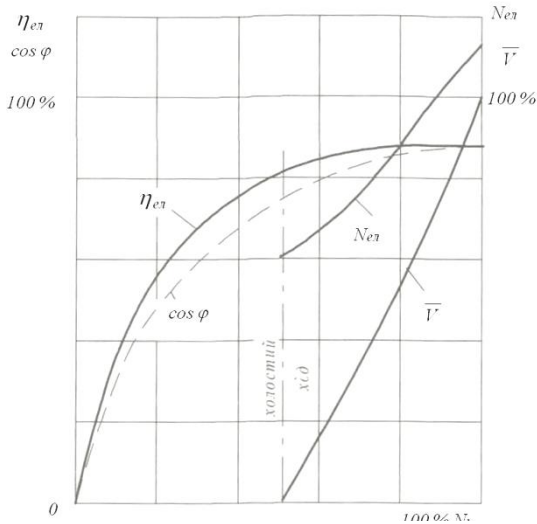


Рисунок 1.10 – Залежність між продуктивністю v , потужністю на валу компресора N_k , ККД електродвигуна $\eta_{ел}$ та коефіцієнтом потужності $\cos \varphi$

Робота двигуна на режимах, відмінних від номінального, пов'язана зі збільшенням електричних втрат, тобто зі зменшенням ККД. ККД електродвигуна зі зменшенням навантаження (тобто споживаної потужності N_k) зменшується тим сильніше, чим менше навантаження (рис. 1.10). На номінальному режимі електрична потужність дорівнює

$$N_{ел} = \frac{N_k}{0,9} = 1,11N_k. \quad (1.19)$$

При переведенні компресора з номінального режиму (100 % N_k) на режим холостого ходу (50 % N_k) ККД електродвигуна знижується від 0,9 до 0,835. Електрична потужність при цьому зменшується до величини

$$N_{елхх} = \frac{0,5N_k}{0,835} = 0,6N_k. \quad (1.20)$$

Таким чином, економія електроенергії від переведення компресора на холостий хід становить $(1,11-0,6)N_k = 0,51N_k$, тобто навіть тоді, коли від компресора не потрібна подача стисненого повітря, він однаково споживає електроенергію, що дорівнює 49 % від номінальної величини. На практиці через негерметичність засувки, а іноді й навмисне її нещільне закриття з метою недопущення перегрівання масла у компресорі економія електроенергії трохи менша. Звідси випливає, що у разі, якщо тривалість роботи на холостому ходу велика, переривчасте регулювання вимкненням двигуна більш економічне, ніж перехід на холостий хід.

Але у випадках, коли компресор працює в режимі, близькому до номінального навантаження, і, отже, періоди роботи тривалі, а зупинення короткочасні, більш економічне регулювання переходом на холостий хід.

При зменшенні продуктивності компресора приблизно пропорційно змінюється й споживана потужність аж до режиму «холостого ходу» (рис. 1.10). Електрична потужність з урахуванням зменшення ККД електродвигуна і $\cos \varphi$ трохи вища від споживаної, але в цілому зберігає ту саму закономірність. З рисунка 1.10 випливає також, що для полегшення запуску електродвигуна пуск компресора варто робити із закритим дисковим затвором при мінімальному пу-

сковому струмі. Однак пуск повинен бути короткочасним (3–5 с), щоб не допустити роботу гвинтового компресора на збідненому змащенні.

1.1.2.3. Регулювання відцентрових компресорів

Регулювання відцентрових компресорів так само, як і об'ємних машин, здійснюється перенесенням характеристики, що досягається різними способами. При цьому необхідно враховувати неминучу зміну ККД компресора. Застосовується лише безперервне регулювання.

Найбільш економічний метод регулювання відцентрових компресорів, як і інших, – це зміна частоти обертання ротора. Метод особливо ефективний, якщо мережа має характеристику, близьку до квадратичної параболи.

Особливістю компресорних машин є прямі залежності параметрів від частоти обертання, що виражаються формулами:

$$\frac{V'}{V_0} = \frac{n'}{n_0}, \quad \frac{H'}{H_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^2, \quad \frac{N'}{N_0} = \left(\frac{n}{n_0}\right)^3. \quad (1.21)$$

Якщо замість напору H потрібно визначити зміну ступеня стиску, то залежність ускладнюється:

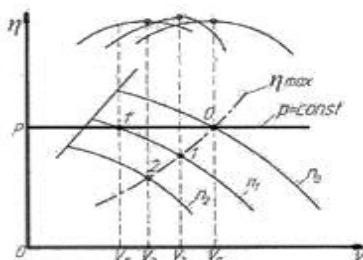
$$\pi' = \left[1 + \left(\frac{n'}{n}\right)^2 \frac{T}{T'} (\sqrt[3]{\pi_0} - 1) \right]. \quad (1.22)$$

Характеристики компресора зі зменшенням частоти обертання зміщуються у бік менших продуктивностей і напорів (рис. 1.11).

Позитивною особливістю турбокомпресорів є практична сталість ККД із переходом на нові режими регулювання за частотою обертання. Якщо витрата газу на вході в робоче колесо дорівнює добутку торцевої площі вхідного патрубку на осьову швидкість $V = Fc_a$, то зміна V пропорційна частоті обертання й викликає таку саму зміну швидкості c_a . Відбувається подібне перетворення трикутника швидкостей на вході в робоче колесо, що забезпечує безударне натікання потоку на вхідні крайки робочих лопаток (рис. 1.11 б).

Режими, що відповідають максимальному ККД, при різних частотах обертання утворюють геометричне місце точок, що відповідає лінії $\eta = \eta_{max}$ на рис. 1.11 а, яка збігається з квадратичною характеристикою мережі або близька до неї. Цим і пояснюється висока економічність такого методу регулювання.

а)



б)

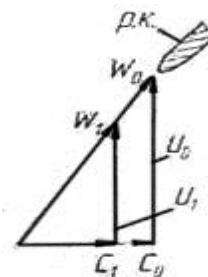
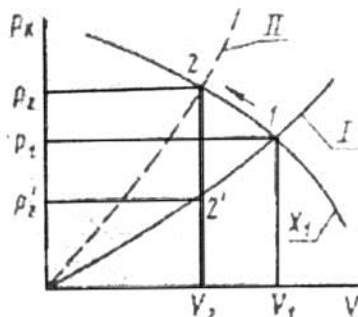


Рисунок 1.11 – Характеристики відцентрового компресора (а) і вхідний трикутник швидкостей (б) при регулюванні частотою обертання

При дроселюванні на нагнітанні характеристика компресора залишається незмінною, а зменшення продуктивності досягається за рахунок додаткового опору на дроселі (рис. 1.12 а). Дроселювання на нагнітанні приводить до зростання напору компресора і кінцевого тиску перед дроселем до величини p_2 , що призведе до безповоротних втрат енергії на дроселі, тиск за яким дорівнює p'_2 . Тому такий спосіб регулювання неекономічний.

а)



б)

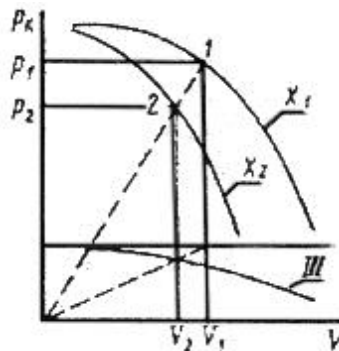


Рисунок 1.12 – Регулювання режиму роботи компресорних установок дроселюванням на нагнітанні (а), дроселюванням на всмоктуванні (б):

I – характеристика мережі; II – характеристика мережі при дроселюванні на нагнітанні; III – характеристики дросельного пристрою; X – вихідна характеристика компресора; X₂ – характеристика компресора після регулювання; 1 – вихідна робоча точка компресора; 2 – робоча точка компресора після регулювання

Найпоширеніший спосіб регулювання стаціонарних відцентрових компресорів – дроселювання на вході (на всмоктуванні). При дроселюванні потоку газу перед входом у робоче колесо створюється розрідження, зменшується густина газу. При постійній частоті обертання об'ємна витрата v_{ec} не змінюється. Залишається незмінним і відношення тисків компресора: $\pi = p_k / p_{ec}$. Тиск на нагнітанні зменшується пропорційно p_{ec} , а масова витрата зменшується пропорційно густині на всмоктуванні.

Дросель є зовнішнім пристроєм щодо компресора, але його вплив позначається на характеристиці компресора і в кінцевому підсумку – на параметрах газу в споживача. Тому втрати в дроселі відносять до компресора.

Важливо зазначити, що зниження тиску на нагнітанні відбувається як за рахунок втрат у дроселі Δp_θ , так і за рахунок зниження ступеня стиску π . Оскільки Δp_θ є чиста втрата енергії потоку газу, то економічність такого способу незначна. До того ж діапазон регулювання за продуктивністю при заданому обмеженні за тиском, що допускається мінімально, досить вузький.

Зі способів регулювання шляхом впливу на елементи проточної частини найпоширеніше регулювання за допомогою вхідного напрямного апарата з поворотними лопатками (рис. 1.13).

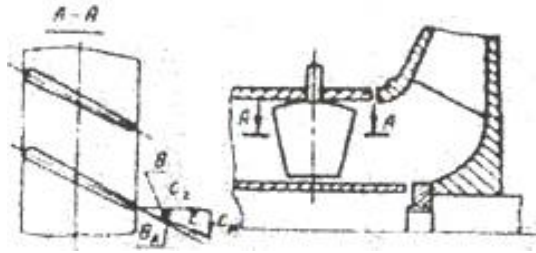


Рисунок 1.13 – Конструктивна схема вхідного регулювального апарата осевого типу

Суть способу полягає в тому, що при повороті лопаток апарата, розміщеного перед входом у робоче колесо, відбувається, з одного боку, зменшення прохідного перерізу, а отже, витрати газу, з іншого боку, струмені газу попередньо закручуються, що відповідно до рівняння Ейлера:

$$h = c_{u2}u_2 - c_{u1}u_1$$

приводить до збільшення ($c_{u1} < 0$) або зменшення $c_{u1} > 0$ напору. Як і у випадку регулювання за частотою обертання, трикутники швидкостей на вході в колесо змінюються подібно, хоча й у меншому ступені. Тому ККД зберігається досить високим при невеликих кутах повороту лопаток.

Якщо за умовами експлуатації необхідно витримувати вимогу $p = \text{const}$, то при значному зниженні продуктивності можливе настання режиму помпажу.

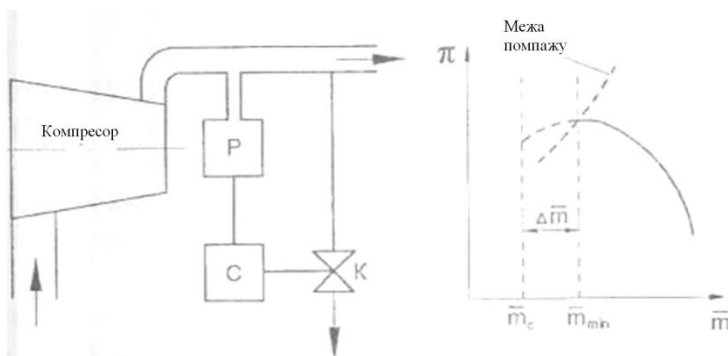


Рисунок 1.14 – Принципова схема антипомпажного регулювання

У цьому випадку спрацьовує спеціальна система антипомпажного регулювання.

Причиною виникнення помпажу є випадкове зниження витрати газу через компресор, що викликає неприпустиме підвищення тиску в проточній частині. Очевидно, що метод боротьби із цим явищем полягає в штучному збільшенні витрати шляхом відведення газу з нагнітання на всмоктування через байпасну лінію або для повітряних компресорів – скидання повітря в атмосферу.

Із цією метою на нагнітанні встановлюється датчик-регулятор витрати повітря P , що формує імпульси для керування сервоприводом C антипомпажного випускного клапана K (рис. 1.14). При малій витраті в мережі m_c робоча точка зміщується вправо до припустимого мінімального режиму m_{min} на величину $\Delta \dot{m}$, яка дорівнює витраті повітря, що скидається.

1.1.2.4. Переривчасте регулювання компресорів

Спосіб визначення характеристик переривчастого регулювання аналогічний ступеневому регулюванню. Відмінність полягає лише в тому, що замість фази холостого ходу $\Delta t_{x.x}$ вводиться тривалість вимкнення двигуна Δt_{zyn} . Відпо-

відно замість потужності холостого ходу варто брати нульову потужність. Регулювальні характеристики, як розмірні, так і безрозмірні, мають вигляд, аналогічний формулам (1.5)–(1.11), а також рис. 1.7, необхідно лише $\Delta t_{x,x}$ замінити на $\Delta t_{зуп}$.

Потужність, споживана електроприводом за один цикл, з (1.15) дорівнює

$$N_u = N_n \frac{\Delta t_n}{\Delta t_u} = N_n \Delta \bar{t}_n. \quad (1.23)$$

У цьому випадку має місце значна економія потужності порівняно з регулюванням переходу на холостий хід за однакових значень тривалості фази нагнітання Δt_n (порівняно з формулою (1.15)).

Очевидно, що умовою, за якої припустиме і доцільне регулювання шляхом зупинення подальшого пуску двигуна, буде нерівність

$$\Delta t_{зуп} \geq \frac{60}{i}, \quad (1.24)$$

де i – припустима кількість вмикань за 1 годину (табл. 1.2).

Таблиця 1.2 – Припустима кількість вмикань за 1 годину асинхронних електродвигунів

Потужність, кВт	285	180	162	80	60	36
i , зуп/годину	4	6	6	8	10	20
$\Delta t_{зуп}$, хв	15	10	10	7,5	6	3

Із виразів (1.6') і (1.24) можна визначити, при якому відносному споживанні повітря доцільно застосовувати регулювання вмиканням – вимиканням:

$$q_v \leq \frac{Q}{60V_k} (\varepsilon_1 - \varepsilon_1) i. \quad (1.25)$$

Економія потужності при цьому визначається з виразів (1.15) і (1.16), беручи до уваги, що

$$\Delta \bar{N} = N_n (1 - q), \quad (1.26)$$

таким чином, в $1/1 - q$ разів більша, ніж при переході на холостий хід.

Найбільш економічним способом регулювання режиму роботи компресора є комбінований, тобто полягає в поєднанні повторно-короткочасного режиму «вмикання – вимикання» та умовно-безперервного режиму з переходом на холостий хід і назад. Очевидно, що необхідно уникати як надмірно довгих фаз холостого ходу, так і занадто коротких зупинень. Зупинити компресор або перевести на холостий хід – залежить від тривалості цих фаз. Для оцінювання можливої тривалості фаз і прийняття рішення служить певний алгоритм, запрограмований у блоці мікропроцесорної системи керування компресором. Алгоритм здійснює оброблення вхідних сигналів від штатних датчиків, виконує обчислювальні й логічні операції та формує командні процедури на керування установкою.

1.2. Моделювання нестационарних режимів течії потоків, що несуть суспензію, у трубопровідних системах «компресор – гірниче технологічне устаткування»

Використання компресорного устаткування в технологіях перероблення мінеральної сировини визначено необхідністю підвищення ефективності процесів класифікації, сепарації, транспортування та сушіння (висушування) промислових продуктів та концентратів руд чорних і кольорових металів.

Під час перероблення мінеральної сировини широко використовуються сухі методи збагачення, що передбачають магнітну та електростатичну сепарацію. Характерною особливістю технологічної схеми при сухому збагаченні є значна кількість транспортного устаткування: конвеєрів, елеваторів, шнеків і пневможолобів, де технологічними потоками є аеросуміші. При цьому ефективність процесу збагачення визначається стабільністю роботи її аспіраційно-знепилювальних систем (АЗС), що істотно впливає на режими роботи технологічного устаткування.

Структурними елементами АЗС є компресори, трубопроводи і технологічні ємності. Під час розроблення математичних моделей АЗС необхідно скласти відповідні рівняння, що виражають динамічний взаємозв'язок між параметрами режиму роботи АЗС і кожного з елементів.

Для технологічних ємностей, укриттів об'єктів, що аспіруються, і знепилювального устаткування ці рівняння виражають залежність швидкості зміни тиску в ємності від різниці подач, що надходить до неї, та аеросуміші, яка витікає з неї. Такі залежності повинні бути записані для будь-якого об'єкта АЗС, що має істотну акустичну гнучкість, – мокрого фільтра, циклона, пилеосадної камери, накопичувального силоса і бункера, камерного живильника, відцентрового знепилювача, труби-сушарки та сушильного барабана та ін.

Диференціальне рівняння для трубопроводу виражає залежність швидкості зміни подачі через нього від різниці тиску та аеродинамічних втрат. При цьому трубопроводи, що розглядаються, можна поділити на такі види: трубопровід із компресором, на одному з кінців якого розміщена технологічна ємність, а також трубопровід без компресора, що з'єднує дві технологічні ємності.

Таким чином, кожний з елементів АЗС, крім компресорів, описується двома основними характеристиками – витратно-напірною й акустичною. Для опису компресора достатньо його витратно-напірної характеристики. Трубопроводи мають акустичну масу L_a та аеродинамічний опір, що характеризує залежність втрат напору від подачі через трубопровід. Технологічна ємність має певну акустичну гнучкість C_a , яка характеризує швидкість зміни тиску в ємності при зміні витрати. При цьому рівняння для технологічної ємності враховує зміну в ній властивостей аеросуміші. Технологічні ємності в АЗС можна поділити на три види – ємності, в яких відбувається утворення аеросуміші (змішувачі); ємності, в яких здійснюється виділення твердих частинок із потоку (сепаратори); та ємності, в яких концентрація аеросуміші не змінюється (бункери).

Висновок визначальних рівнянь для кожного типу технологічних ємностей ґрунтується на розгляді балансу маси.

Необхідно зазначити, що величина густина аеросуміші, що входить до виразу для акустичної гнучкості, розглядається як стала, у зв'язку з цим у технологічних ємностях у результаті процесів стиснення або розширення змінюється лише густина газу, величина якої дуже мала порівняно з густиною твердих частинок. Отже, наявність твердих частинок в аеросуміші впливає на акустичні характеристики устаткування, і цей вплив ураховується запропонованим нижче коефіцієнтом призначення технологічної ємності.

Аналіз засвідчує, що структурні схеми АЗС, які використовуються в гірничих технологіях, визначаються видами трубопроводів. Кожній структурній схемі відповідає своя розрахункова схема (рис. 1.15, 1.16). Ці схеми характеризуються наявністю спеціального живильника, розміщеного за компресором. Друга схема (рис. 1.16) відрізняється наявністю двох апаратів, які мають акустичну гнучкість, що зумовлює наявність додаткових рівнянь для відповідних систем. Математичні моделі АЗС складаються з відповідних їй елементів рівнянь. Так, моделі нестационарного процесу роботи для першої схеми (рис. 1.15) мають вигляд

$$\left. \begin{aligned} L_a \frac{dQ_k}{dt} &= F(Q_k) - H(Q_k) - (P_{\delta} - P_a), \\ C_a \frac{dP_{\delta}}{dt} &= kQ_k - Q_m(P_{\delta}), \\ M_a \frac{dQ_m}{dt} &= (P_{\delta} - P_a) - \Phi(Q_m, P_{\delta}), \end{aligned} \right\} \quad (1.27)$$

де L_a – акустична маса трубопроводу між баком та компресором; M_a – акустична маса трубопроводу, приєднаного до бака; P_{δ} – тиск у баці; C_a – акустична гнучкість бака; Q_k – подача компресора; $F(Q_k)$, $H(Q_k)$ – витратно-напірні характеристики відповідно компресора та приєднаного трубопроводу; P_{δ} і P_a – відповідно тиск в ємності та атмосферний; Q_m – витрата твердого матеріалу між ємностями; k – коефіцієнт призначення технологічної ємності.

Для другої схеми (рис. 1.16) відповідні моделі запишемо в такому вигляді:

$$\left. \begin{aligned} L_a \frac{dQ_k}{dt} &= F(Q_k) - H(Q_k) - (P_{\delta 1} - P_a), \\ C_a \frac{dP_{\delta 1}}{dt} &= k_1 Q_k - Q_1(P_{\delta 1}), \\ M_a \frac{dQ_1}{dt} &= P_{\delta 1} - P_{\delta 2} - \Phi(Q_1, P_{\delta 1}, P_{\delta 2}), \\ K_a \frac{dP_{\delta 2}}{dt} &= k_2 Q_1 - Q_2(P_{\delta 2}), \end{aligned} \right\} \quad (1.28)$$

де L_a – акустична маса трубопроводу устаткування; $P_{\delta 1}$ і $P_{\delta 2}$ – тиск у баці, розміщеному відповідно на початку і кінці трубопроводу; C_a , K_a – акустичні гнучкості ємностей на трубопроводах, що всмоктують і нагнітають; Q_1 , Q_2 – по-

дача відповідно на вході та виході з технологічної ємності; $\Phi(Q, P_{\#1}, P_{\#2})$ – витратно-напірна характеристика трубопроводу.

Рівняння для визначення параметрів робочого режиму залежно від обраної схеми визначаються за умови рівності нулю правих частин рівнянь (1.27) і (1.28). Для рівнянь (1.27) параметри стану рівноваги системи визначаються з розв'язання системи

$$\left. \begin{aligned} F(Q_k) - H(Q_k) - (P_{\sigma} - P_a) &= 0, \\ kQ_k - \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{gDFr(P_{\sigma})} &= 0, \\ P_{\sigma} - P_a - \Phi(Q_m, P_{\sigma}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.29)$$

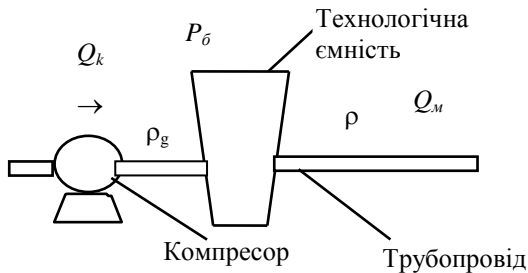


Рисунок 1.15 – Перша розрахункова схема

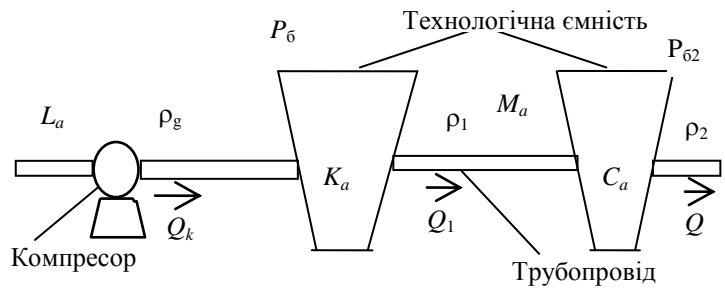


Рисунок 1.16 – Друга розрахункова схема

Число коренів одержаної системи визначається числом стаціонарних режимів. Розглянемо випадок, коли є одна стійка точка, координати якої Q_k^* та P_{σ}^* . Перепишемо розглянуту систему рівнянь щодо відхилень від стаціонарних величин, розділивши обидві частини рівнянь на акустичні характеристики і ввівши такі співвідношення:

$$Q_k = Q_k^* + G, \quad P_{\sigma} = P_{\sigma}^* - P, \quad Q = Q_k^* + Q. \quad (1.30)$$

Розвинувши в ряд Тейлора відповідні функції та зберігши лише лінійні члени, одержимо систему рівнянь для аналізу стійкості точки рівноваги:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dG}{dt} &= (F' - H') \frac{G}{L_a} - \frac{P}{L_a}, \\ \frac{dP}{dt} &= \left[k \frac{1 + \mu - a}{1 + \mu} + \frac{(1 + a + \mu)a}{(1 + a)(1 + \mu)} \right] \frac{G}{C_a} - \frac{\varphi P}{C_a} + \frac{a}{1 + \mu} [k - 1] \frac{Q}{C_a}, \\ \frac{dQ}{dt} &= \frac{1 - \partial \Phi / \partial P_{\sigma}}{M_a} P - \left[\frac{\partial \Phi}{\partial Q_m} - \frac{(\Phi^* - P_{\sigma}^*)a(1 + a)}{Q_k^*(1 + \mu)(1 + a + \mu)} \right] \frac{Q}{M_a} + \left[\frac{P_{\sigma}^* - \Phi^*}{Q_k^*} \frac{a}{1 + \mu} \right] \frac{G}{M_a}, \\ F' &= \frac{\partial F(Q_k^*)}{\partial Q_k}; \quad H' = \frac{\partial H(Q_k^*)}{\partial Q_k}; \quad \varphi = \frac{\pi D^2 \sqrt{gD}}{8 \sqrt{Fr}} \frac{\partial Fr(P_{\sigma}^*)}{\partial P_{\sigma}}. \end{aligned} \right. \quad (1.31)$$

Під час розвинення правої частини враховували, що зміна концентрації аеросуміші в технологічних ємностях відбувається в результаті коливань як вхідного, так і вихідного потоків. Тому зміну акустичних характеристик елементів АЗС обчислюємо згідно з

$$\frac{\partial C_a}{\partial Q_g} = \frac{C_a}{Q_g} \frac{a\mu}{(1+\mu)(1+\mu+a)}, \quad \frac{\partial C_a}{\partial Q_m} = -\frac{C_a}{Q_m} \frac{a}{1+\mu},$$

$$\frac{\partial L_a}{\partial Q_g} = -\frac{L_a}{Q_g} \frac{a\mu}{(1+\mu)(1+a+\mu)}, \quad \frac{\partial L_a}{\partial Q_m} = \frac{L_a}{Q_m} \frac{a}{1+\mu}.$$

Стійкість системи (1.31) досліджена нижче методом Гурвіца. Аналіз коефіцієнтів у рівняннях (1.31) свідчить, що для більшої частини характерних випадків величиною деяких доданків можна знехтувати. З урахуванням цього система (1.31) запишеться у вигляді, для якого можна виділити корені характеристичного багаточлена:

$$\left. \begin{aligned} L_a \frac{dG}{dt} &= (F' - H')G - P, \\ C_a \frac{dP}{dt} &= kG - \varphi P, \\ M_a \frac{dQ}{dt} &= P - \Phi'_Q Q - \Phi'_P P, \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

$$\Phi'_Q = \frac{\partial \Phi(Q_m^*)}{\partial Q_m}; \quad \Phi'_P = \frac{\partial \Phi(P_{\dot{x}}^*)}{\partial P_{\dot{x}}}.$$

Характеристичний визначник для цієї системи має вигляд

$$\begin{vmatrix} \frac{F' - H'}{La} - \lambda & -\frac{1}{La} & 0 \\ \frac{k}{Ca} & -\frac{\varphi}{Ca} - \lambda & 0 \\ 0 & \frac{1 - \Phi'_P}{M_a} & -\frac{\Phi'_Q}{M_a} - \lambda \end{vmatrix}. \quad (1.33)$$

Умовою стійкості для схеми (рис. 1.15) буде від'ємність речових частин усіх коренів (1.33):

$$\lambda_1 = -\frac{\Phi'_Q}{M_a}, \quad \lambda_{2,3} = \frac{1}{2} \left(\frac{F' - H'}{La} - \frac{\varphi}{Ca} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{F' - H'}{La} + \frac{\varphi}{Ca} \right)^2 - \frac{k}{La Ca}}. \quad (1.34)$$

Для другої схеми (рис. 1.16) із системи (1.28) одержана така система рівнянь для визначення стаціонарного режиму:

$$\left. \begin{aligned} F(Q_k) - H(Q_k) - (P_{\delta 1} - P_a) &= 0, \\ k_1 Q_k - Q_1(P_{\delta 1}) &= 0, \\ P_{\delta 1} - P_{\delta 2} - \Phi(Q_1, P_{\delta 1}, P_{\delta 2}) &= 0, \\ k_2 Q_1 - Q_2(P_{\delta 2}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

якій відповідає така система рівнянь у відхиленнях:

$$\begin{cases}
\frac{dG}{dt} = (F' - H') \frac{G}{L_a} - \frac{P}{L_a}, \\
\frac{dP}{dt} = \left[k_1 - \frac{a}{1+\mu} \left(k_1 - \frac{1+a+\mu}{1+a} \right) \right] \frac{G}{C_a} - \sigma_2 \frac{\varphi_{21}}{C_a} P + \frac{a}{1+\mu} \left[k_1 \frac{1+a}{1+a+\mu} - 1 \right] \frac{Q}{C_a}, \\
\frac{dQ}{dt} = \left(1 - \frac{d\Phi}{dP_{\phi_1}} \right) \frac{P}{M_a} - \frac{d\Phi}{dQ_m} \frac{Q}{M_a} - \left(1 + \frac{d\Phi}{dP_{\phi_2}} \right) \frac{y}{M_a}, \\
\frac{dy}{dt} = \left[k_2 + \frac{a}{1+\mu} \left(k_2 - \frac{1+a+\mu}{1+a} \right) \right] \frac{Q}{K_a} - \left[1 + \frac{a}{1+\mu} \left(k_2 \frac{1+a+\mu}{1+a} - 1 \right) \right] \frac{\varphi_{22}}{K_a} y, \\
\varphi_{ij} = \frac{\pi D_i^2 \sqrt{g D_i}}{8 \sqrt{Fr_*}} \frac{dFr_i}{dP_{\phi_j}};
\end{cases} \quad (1.36)$$

$$\left. \begin{cases}
L_a \frac{dG}{dt} = (F' - H')G - P, \\
C_a \frac{dP}{dt} = k_1 G - \varphi_{11} P, \\
M_a \frac{dQ}{dt} = (1 - \Phi'_1)P - \Phi'_2 Q - (1 + \Phi'_2)y, \\
K_a \frac{dy}{dt} = k_2 Q - \varphi_{22} y,
\end{cases} \right\} \quad (1.37)$$

та корені характеристичного багаточлена:

$$\begin{aligned}
\lambda_{1,2} &= -\frac{1}{2} \left(\frac{\Phi'_2}{M_a} + \frac{k_1 - \varphi_{22}}{K_a} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{\Phi'_2}{M_a} + \frac{k_1 - \varphi_{22}}{K_a} \right)^2 - \frac{1 + \Phi'_2}{M_a} \frac{k_2}{K_a}}, \\
\lambda_{3,4} &= \frac{1}{2} \left(\frac{F' - H'}{L_a} - \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{F' - H'}{L_a} - \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right)^2 - \frac{k_1}{L_a C_a}}.
\end{aligned}$$

Сформульовані вище умови стійкості режимів роботи АЗС різної конфігурації не дозволяють визначити основні параметри коливальних процесів, що виникають. Для цього необхідно звести систему рівнянь, які описують режим роботи АЗС, до одного рівняння вищого порядку.

Коливальний процес зазвичай характеризується коловою частотою і декрементом коливань. Оцінімо ці параметри під час роботи АЗС розглянутих типів.

Систему рівнянь (1.32) можна звести до одного диференціального рівняння третього порядку, яке після перетворень запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
\frac{d^3 Q}{dt^3} + a_1 \frac{d^2 Q}{dt^2} + a_2 \frac{dQ}{dt} + a_3 Q &= 0, \quad (1.38) \\
a_1 &= \frac{\Phi'_2}{M_a} + \frac{\varphi}{C_a} - \frac{F' - H'}{L_a}, \quad a_3 = \left(\frac{k_1 - \varphi(F' - H')}{L_a C_a} \right) \frac{\Phi'_2}{M_a}, \\
a_2 &= \frac{\Phi'_2}{M_a} \left(\frac{\varphi}{C_a} - \frac{F' - H'}{L_a} \right) + \left(\frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\varphi}{L_a C_a} (F' - H') \right).
\end{aligned}$$

Зміну тиску в першій технологічній ємності другої схеми (рис. 1.16) можна визначити на підставі перших двох рівнянь системи (1.37) з розв'язання такого рівняння:

$$\frac{d^2 P}{d\tau^2} + 2\bar{\varepsilon}_0 \frac{dP}{d\tau} + P = 0, \quad (1.39)$$

$$\tau = t\varpi_0; \quad \varpi_0 = \sqrt{\frac{k_1 - (F' - H')\varphi_{11}}{C_a L_a}}, \quad \bar{\varepsilon}_0 = \frac{1}{2} \frac{L_a \varphi_{11} + (F' - H')C_a}{\sqrt{k_1 - (F' - H')\varphi_{11}} \sqrt{L_a C_a}},$$

сталі розв'язки якого мають вигляд:

$$P = P_0 \frac{\psi(t)}{\exp(\delta_0 t)}, \quad (1.40)$$

$$\text{где } \delta_0 = \frac{L_a \varphi_{11} + (F' - H')C_a}{2C_a L_a}, \quad \psi(t) = \begin{cases} \frac{\bar{\varepsilon}_0 \operatorname{ch}(\varpi t) - \sqrt{\bar{\varepsilon}_0^2 - 1} \operatorname{sh}(\varpi t)}{4\sqrt{\bar{\varepsilon}_0^2 - 1}}, & \bar{\varepsilon}_0 > 1, \\ \cos(\bar{\omega} t), & 0 < \bar{\varepsilon}_0 < 1, \end{cases}$$

$$\varpi = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{\varphi_{11}}{C_a} + \frac{(F' - H')}{L_a} \right)^2 - \frac{4[k_1 - (F' - H')\varphi_{11}]}{L_a C_a}},$$

$$\bar{\omega} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4[k_1 - (F' - H')\varphi_{11}]}{L_a C_a} - \left(\frac{\varphi_{11}}{C_a} + \frac{(F' - H')}{L_a} \right)^2}.$$

Рівняння для визначення зміни тиску в другій технологічній ємності другої схеми (рис. 1.16) має вигляд

$$\frac{d^2 y}{d\tau^2} + 2\varepsilon \frac{dy}{d\tau} + y = \bar{\psi} \frac{\psi(\tau)}{\exp(\sigma\tau)}, \quad (1.41)$$

$$\tau = \omega_0 t, \quad \omega_0 = \frac{\sqrt{1 + \Phi'_2 + \varphi_{22}\Phi'_Q}}{\sqrt{M_a K_a}}, \quad \bar{\psi} = \frac{1 - \Phi'_1}{K_a M_a} k_2 P_0, \quad \sigma = \frac{\delta_0}{\omega_0},$$

$$\varepsilon = \frac{M_a \varphi_{22} + K_a \Phi'_Q}{2\sqrt{M_a K_a} \sqrt{1 + \Phi'_2 + \varphi_{22}\Phi'_Q}}.$$

Формули (1.38)–(1.41) свідчать про те, що при коливальних процесах в АЗС декремент коливань пульсації швидкості частинок дорівнює різниці між зворотними величинами часу релаксації швидкості частинки і декремента загасання подачі пилогазового потоку. В аналітичному вигляді це можна записати так:

$$P_o(t) = P_o \frac{\psi(t)}{\exp\left\{\left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}\right)t\right\}}, \quad \tau_1 = \frac{2C_a \sqrt{Fr}}{\pi D^2 \sqrt{gD}} \left(\frac{dFr}{dP_1}\right)^{-1}, \quad \tau_2 = \frac{2La}{\frac{dH}{dG} - \frac{dF}{dG}}.$$

Нестационарні процеси в АЗС характеризуються тим, що параметри руху частинок аеросуміші, зокрема декремент загасання пульсації швидкості, визначаються пульсаціями тиску в технологічних ємностях АЗС. У свою чергу, пульсації тиску в технологічній ємності залежать від динамічних характеристик трубопроводів, приєднаних до неї. Для вихідного трубопроводу пульсації тиску залежать від декремента загасання подачі пилогазового потоку, який прямо пропорційний акустичній масі трубопроводу і обернено пропорційний різниці

похідних за подачею від витратно-напірних характеристик трубопроводу і компресора. Вхідний потік характеризується часом релаксації частинки, який прямо пропорційний акустичній гнучкості технологічної ємності та обернено пропорційний похідній за тиском від зворотної витратно-напірної характеристики трубопроводу. З урахуванням цього з аналізу рівнянь для пульсації тиску в технологічній ємності встановлено, що декремент коливання тиску і відповідно декремент загасання пульсації швидкості частинок, що надходять до технологічної ємності, визначаються різницею між зворотними величинами зазначених параметрів вхідного і вихідного трубопроводів.

Аналіз одержаних залежностей дозволяє визначити частоти і декременти коливань в АЗС з розв'язання лінійного диференціального рівняння третього порядку.

Характеристичне рівняння для першої схеми є кубічним, і його корені визначаються залежно від дискримінанта за формулами Кардано. При цьому в разі позитивного дискримінанта загальний вигляд розв'язків

$\lambda_1 = \lambda - \frac{a_1}{3}$, $\lambda_{2,3} = -\frac{\lambda_1}{2} \pm i \frac{\sqrt{3}}{2} \mu'$, при дискримінанті, що дорівнює нулю: $\lambda_1 = \lambda - \frac{a_1}{3}$, $\lambda_2 = \lambda_3 = -\frac{\lambda_1}{2}$, при негативному дискримінанті $\lambda_1 = \lambda - \frac{a_1}{3}$, $\lambda_{2,3} = -\frac{\lambda_1}{2} \pm \mu'$, де величини λ та μ визначаються з розв'язання наведеного рівняння.

Таким чином, загальні розв'язки мають вигляд:

$$Q = \rho e^{\lambda_1 t} \cos \varphi + e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} [\rho_1 \cos(\mu t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\mu t - \varphi_2)],$$

$$Q = A e^{\lambda_1 t} + e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} (B + Ct), \quad Q = A e^{\lambda_1 t} + e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} [Bch(\mu t) + Csh(\mu t)], \quad \mu = \frac{\sqrt{3}}{2} \mu'.$$

Аналіз одержання розв'язків показує, що в АЗС першого типу згасаючі коливання можливі за таких умов: якщо коефіцієнт при першому доданку дорівнює нулю при додатному λ_1 та дорівнює нулю другий доданок при від'ємному λ_1 . Таким чином, виразивши при додержанні початкових умов довільні сталі через параметри АЗС, можна сформулювати для них обмеження за умови стійкості режимів роботи. Можна виділити чотири стійких режими роботи АЗС цього типу:

$$Q = e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} [\Omega_1 \cos(\mu t + \varphi_1) + \Omega_2 \cos(\mu t - \varphi_2)], \quad Q = \Omega e^{-\lambda_1 t}, \quad (1.42)$$

$$Q = e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} [\Omega_1 ch(\mu t) + \Omega_2 sh(\mu t)], \quad Q = e^{-\frac{\lambda_1 t}{2}} (\Omega_1 + \Omega_2 t). \quad (1.43)$$

Для другої схеми (рис. 1.16) можливі такі варіанти згасаючих коливальних процесів при $\varepsilon > 1$ та при $0 < \varepsilon < 1$.

При $\varepsilon > 1$

$$f(\tau) = \begin{cases} \frac{\bar{\psi}}{4\mu} \frac{[Ash(\mu\tau) + Bch(\mu\tau)]}{\exp(\sigma\tau)} + \frac{[D_1 sh(\mu\tau) + D_2 ch(\mu\tau)]}{\exp(\varepsilon\tau)}, & \bar{\varepsilon}_0 > 1, \\ \frac{\bar{\psi}}{2} \frac{[A \cos(b\tau) + B \sin(b\tau)]}{\exp(\sigma\tau)} + \frac{[D_1 sh(\mu\tau) + D_2 ch(\mu\tau)]}{\exp(\varepsilon\tau)}, & 0 < \bar{\varepsilon}_0 < 1, \end{cases} \quad (1.44)$$

$$\text{де } \mu = \sqrt{\varepsilon^2 - 1}; \quad b = \sqrt{\bar{\varepsilon}_0^2 - 1} \frac{\bar{\omega}_0}{\omega}.$$

При $0 < \varepsilon < 1$

$$f(\tau) = \begin{cases} 2\psi \frac{[Ach(b\tau) + Bsh(b\tau)]}{\exp(\sigma\tau)} + D \frac{\cos(\mu\tau)}{\exp(\varepsilon\tau)}; \bar{\varepsilon}_0 > 1, \\ 2\psi \frac{[A\cos(b\tau) + B\sin(b\tau)]}{\exp(\sigma\tau)} + \frac{[D_1ch(\mu\tau) + D_2sh(\mu\tau)]}{\exp(\varepsilon\tau)}, 0 < \bar{\varepsilon}_0 < 1, \end{cases} \quad (1.45)$$

де $\mu = \sqrt{1 - \varepsilon^2}$.

Із наведених залежностей випливає, що коливальні режими роботи в АЗС другого типу описуються за допомогою параметрів матеріалу, який транспортується, і витратно-напірних характеристик елементів АЗС, що значно складніше, ніж в АЗС першого типу. У цьому випадку аналітичне дослідження спільного впливу знепилювального устаткування та елементів АЗС на стійкість її режиму роботи виявляється складним.

Для оцінювання умови відсутності коливальних режимів, обравши відповідну до топології АЗС розрахункову схему (рис. 1.15), визначаємо величини, що входять до відповідної системи нерівностей, яка відображає умову сталості розв'язків системи.

При використанні методу Гурвіца для першої схеми АЗС (рис. 1.15) характеристичне рівняння буде кубічним:

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0, \quad (1.46)$$

$$a_1 = \frac{\varphi\Phi'_Q}{C_a M_a} - \frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\wp}{L_a} \left[\frac{\varphi}{C_a} + \frac{\Phi'_Q}{M_a} \right], \quad \wp = F' - H',$$

$$a_2 = \frac{\varphi\Phi'_Q}{C_a M_a} - \frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\wp}{L_a} \left[\frac{\varphi}{C_a} - \frac{\Phi'_Q}{M_a} \right], \quad a_3 = \frac{\Phi'_Q}{M_a} \frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\wp}{L_a} \frac{\varphi}{C_a} \frac{\Phi'_Q}{M_a}.$$

Умовою загасання коливальних процесів для цієї схеми АЗС буде така система нерівностей:

$$a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0, \quad a_1 a_2 - a_3 > 0. \quad (1.47)$$

Для АЗС другої схеми відповідне характеристичне рівняння буде мати вигляд полінома четвертого ступеня:

$$\lambda^4 + a_1\lambda^3 + a_2\lambda^2 + a_3\lambda + a_4 = 0,$$

$$a_1 = \frac{\Phi'_Q}{M_a} + \frac{1 - \varphi_{22}}{K_a} - \frac{\wp}{L_a} + \frac{\varphi_{11}}{C_a}, \quad a_4 = \left(\frac{\Phi'_Q}{M_a} \frac{(1 - \varphi_{22})}{K_a} + \frac{1 + \Phi'_2}{M_a} \frac{k_2}{K_a} \right) \left(\frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\wp}{L_a} \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right),$$

$$a_2 = \left(\frac{\Phi'_Q}{M_a} - \frac{\wp}{L_a} + \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right) \frac{(1 - \varphi_{22})}{K_a} + \frac{1 + \Phi'_2}{M_a} \frac{k_2}{K_a} + \frac{k_1}{L_a C_a} + \left(\frac{\Phi'_Q}{M_a} - \frac{\wp}{L_a} \right) \frac{\varphi_{11}}{C_a} - \frac{\Phi'_Q}{M_a} \frac{\wp}{L_a},$$

$$a_3 = \left(\frac{\Phi'_Q}{M_a} + \frac{1 - \varphi_{22}}{L_a} \right) \left(\frac{k_1}{L_a C_a} - \frac{\wp}{L_a} \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right) - \left(\frac{\wp}{L_a} - \frac{\varphi_{11}}{C_a} \right) \left(\frac{\Phi'_Q}{M_a} \frac{1 - \varphi_{22}}{K_a} + \frac{1 + \Phi'_2}{M_a} \frac{k_2}{K_a} \right).$$

Умовою загасання коливальних процесів для цієї схеми АЗС буде така система нерівностей:

$$a_1 > 0, \quad a_2 > 0, \quad a_3 > 0, \quad a_4 > 0, \quad a_1 a_2 a_3 - a_3^2 - a_1^2 a_4 > 0. \quad (1.48)$$

Таким чином, одержані диференціальні рівняння, що описують рух аеросуміші в трубопроводі і технологічних ємностях АЗС різних видів з урахуван-

ням властивостей аеросуміші, акустичних властивостей технологічного устаткування, компресорів та трубопроводів. Далі на основі теореми про зміну кількості руху та з урахуванням рівняння стану для аеросуміші розроблені аеродинамічні моделі нестационарних режимів роботи для характерних АЗС. Для кожної з цих моделей одержані умови стійкості робочого режиму і витратно-напірні характеристики елементів АЗС з урахуванням їх акустичних параметрів. Крім того, визначені основні параметри, при яких виникають нестационарні процеси в роботі АЗС, і одержані залежності для частоти та декременту коливань у системах. Розроблені аеродинамічні моделі покладені в основу методики розрахунку стійких режимів роботи аспіраційно-знепилювальних систем технологій перероблення мінеральної сировини.

Уперше розроблено методичні основи розрахунків нестационарних режимів течії потоків, що несуть суспензію, у трубопровідних системах на підставі результатів дослідження впливу концентрації та густини твердої фази на параметри коливальних процесів у гетерогенному газовому середовищі. Це дозволило встановити залежності декрементів пульсації швидкості та коливань тиску в технологічних ємностях від властивостей матеріалу, що транспортується, аеросуміші, акустичних і витратно-напірних характеристик компресорів та елементів аспіраційно-знепилювальних систем гірничих підприємств.

РОЗДІЛ 2 ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ

2.1. Нові розробки у сфері створення нових композиційних матеріалів деталей і вузлів компресорного устаткування

2.1.1. Дослідження втомного руйнування деталей шахтних компресорних машин

Більшість деталей сучасних машин і механізмів у процесі експлуатації знає впливу змінних напруг. Вивчення причин та характеру експлуатаційних ушкоджень і руйнувань деталей та вузлів компресорів є актуальним завданням. Тому важливо не лише вивчати експлуатаційні руйнування, а й проводити комплекс досліджень для обґрунтованого вибору матеріалів, що використовуються для виготовлення міцних важливих деталей і вузлів.

Метою цих досліджень є вивчення експлуатаційного руйнування матеріалу штока I ступеня компресора 4M40-I, 12/250-2500 і циліндра IV ступеня компресора 4M40-680/22-320, визначення механічних властивостей і структури, установлення можливих причин виходу з ладу вищезазначених деталей.

Створення питомих тисків, що забезпечують герметичність між контактними поверхнями елементів, досягається під час збирання при прикладенні до стрижня зусилля, що дорівнює $36 \cdot 10^4$ Н. Це положення фіксується спеціальною гайкою. Матеріал штока поршня при цьому перебуває під дією розтягувальних напруг, величина яких циклічно змінюється при стисненні газу в циліндрі.

Із представленого металу штока були виготовлені зразки для визначення механічних властивостей, узяті проби для хімічного аналізу, а також зразки для металографічного дослідження структурного стану матеріалу. Хімічний аналіз



Рисунок 2.1 – Загальний вигляд руйнування нарізної частини штока поршня

проб матеріалу штока, %, за елементами (C-0,36; Si-0,32; Mn-0,62; S-0,01; P-0,01; Cr-1,47; Ni-0,3; Mo-0,2; Al-1,01; Cu-0,2) засвідчує, що метал за хімічним складом відповідає сталі 38ХМЮА. Із порів-

няння результатів механічних випробувань матеріалу штока ($\sigma_{0,2} = 71$ кгс/мм², $\sigma_B = 91$ кгс/мм², $\delta = 17$ %, $\psi = 60$ %, КСУ =

$= 13$ кгс.м/см²) зі значеннями властивостей, закладеними технічними вимогами на його виготовлення ($\sigma_{0,2} = 80$ кгс/мм², $\sigma_B = 95$ кгс/мм², $\psi = 35$ %, КСУ = кгс.м/см²) впливає, що межа текучості ($\sigma_{0,2}$) занижена на 12,5 %. Інші характеристики матеріалу цілком задовільні.

При зовнішньому огляді нарізної частини штока (рис. 2.1) установлено,

що руйнування матеріалу проходило по другому витку різі М39х3. Під час обстеження поверхні різі на збільшеннях до 50 крат виявлені як макро-, так і мікронадриви металу, вм'ятини, вибої, грубі порушення від мехобробки і т. ін.

Під час металографічного дослідження шліфів, виготовлених уздовж і поперек матеріалу стрижня штока, спостерігається смугастість структури внаслідок різного травлення. Це розходження в травленні металу пов'язане з ліквідацією легувальних елементів при кристалізації і наступних режимах прокатування, що збереглася та визначила кінцеву структуру металу штока. На поздовжньому шліфі (рис. 2.2 а) смугастість спостерігається у вигляді світло-темних ліній, що чергуються, а на поперечному шліфі (рис. 2.2 б) має осередковий характер.

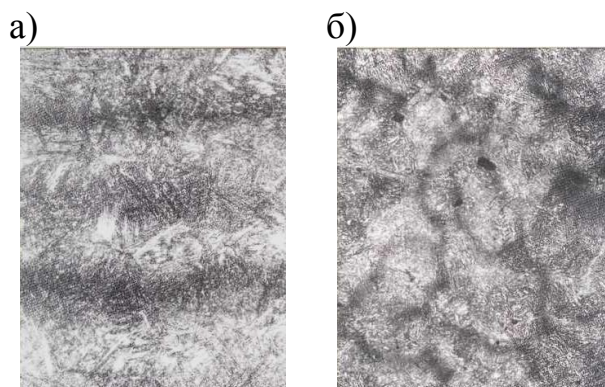


Рисунок 2.2 – Структура поздовжнього (а) і поперечного (б) шліфів

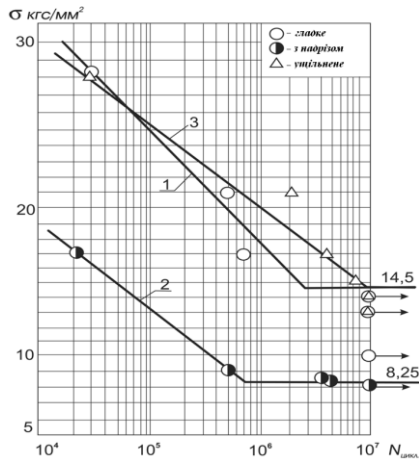
Мікроструктура матеріалу являє собою структуру відпускання з мікротвердістю світлих і темних ділянок ($\mu\text{m} = 225 \text{ кгс/мм}^2$ та $\mu\text{m} = 280 \text{ кгс/мм}^2$) відповідно. Розходження за мікротвердістю свідчить про нерівномірний розподіл легувальних елементів при одержанні заготовки.

Були також проведені дослідження причин руйнування циліндра поршневого компресора. Час напрацювання циліндра становив 15 000 годин,

середовище, що перекачує, – азотоводнева суміш. Були виготовлені кілька серій гладких і з надрізом зразків та проведені втомні випробування на вигин. Для визначення межі втоми матеріалу циліндра була проведена серія випробувань. Умовно виділені зони I і II у зразках, що віддалені одна від одної на 200 мм, зазнавали різних за величиною деформацій.

Криві втомної міцності (із зони II), подані на рис. 2.3 б, показують, що за обраного оптимального режиму зміцнення надрізаного зразка можна домогтися високих значень межі втоми та гладкого рівня. Із проведеного аналізу випливає, що причинами експлуатаційного руйнування циліндра є грубе механічне оброблення жолобника R8 бурту, а також дефектна структура, сформована при порушенні режимів кування, що й обумовило низькі значення механічних властивостей матеріалу.

а)



б)

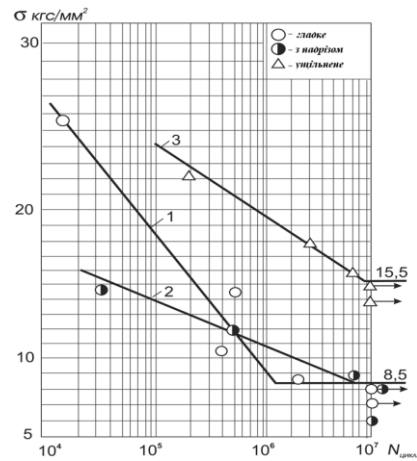


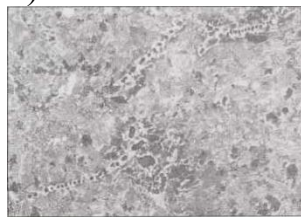
Рисунок 2.3 – Криві втомної міцності сталі 35: а) зона I; б) зона II;
1 – гладкі зразки; 2 – з надрізом; 3 – ущільнені

Із рисунка 2.3 бачимо, що зразки гладкі та з надрізом (зона I) показали приблизно однакове значення межі втоми, що суперечить теорії міцності. Однак металографічні дослідження структури металу дозволяють пояснити одержаний факт. Центральна частина металу кування, розміри якого досить великі, незначно деформується, і всередині залишається груба феритно-перлітна структура (рис. 2.4 а). Крім того, на межах первинного аустенітного зерна (рис. 2.4 б) виявлені скупчення неметалічних включень із феритною облямівкою, що свідчить про перегрівання металу. У структурі матеріалу виявлені мікротріщини (рис. 2.4 в). Після поверхнево-пластичного деформування зразків із дефектного матеріалу значення межі втомної міцності підвищилося до 15,5 кгс/мм², тобто в 1,8 раза. Оскільки зона II металу циліндра віддалена від зони I на 200 мм, то тут уже більш відчутно спостерігається зміна в структурі (рис. 2.4 г), що зазнала більшого рівня деформації в момент кування.

а)



б)



в)



г)



Рисунок 2.4 – Мікроструктура сталі 35 (x200)

Відомо, що для кольорових металів і загартованих сталей не вдається установити таке число циклів, витримавши яке зразок не зруйнувався б у подальшому. Отже, вводиться поняття умовної межі витривалості. При цьому за умовну межу витривалості береться напруга, за якої зразок здатний витримати 10⁸ циклів. Визначення межі витривалості є трудомісткою операцією, тому була зроблена спроба зв'язати емпіричними формулами межу витривалості з відомими механічними характеристиками матеріалу. Зазвичай вважається, що для ста-

лей межа витривалості при вигинанні становить половину від межі міцності σ_s :

$$\sigma = (0,4 - 0,5)\sigma_s.$$

Для високоміцних сталей можна взяти

$$\sigma = 4000 + \frac{1}{6}\sigma_s, \text{ кг/см}^2.$$

Аналогічно випробуванню на чистий вигин можна проводити випробування на крутіння в умовах напруг, що циклічно змінюються. У цьому випадку

$$\tau_{-1} = (0,2 - 0,3)\sigma_s.$$

Зазначені співвідношення варто застосовувати з обережністю, оскільки вони одержані лише для певних матеріалів і за певних умов випробувань (при вигинанні, крутінні).

Стрілками А, В, С та А₁, В₁, С₁ на рис. 2.5 а–б позначені місця зародження тріщин. Подальше їх поширення проходило приблизно під кутом 45° до осі стрижня. При злитті тріщин сформувався малюнок типу «двутавра», що чітко проглядається на сполучених поверхнях зламу. Друге руйнування відбувалося внаслідок зародження тріщин у западині між першим і другим витками з виходом у місце западини між 4-м і 5-м витками. Траєкторія просування магістральної тріщини до половини перерізу стрижня проходила під кутом 45°, а інший переріз – під кутом 90° до осі стрижня.

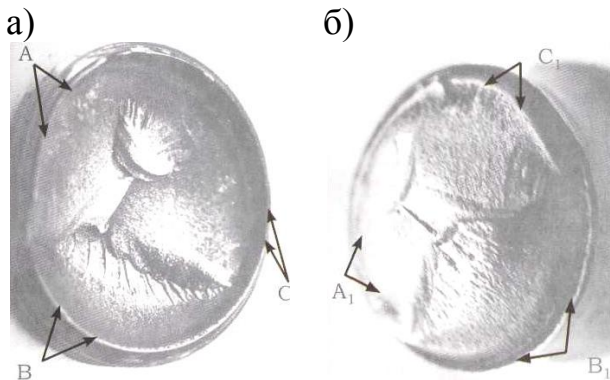


Рисунок 2.5 – Сполучені поверхні (а, б) експлуатаційного руйнування матеріалу штока

пересичених твердих розчинів вуглецю в залізі, які перешкоджають руху дислокацій, але полегшують утворення тріщин (рис. 2.5).

Відомі методики контролю зміни міцнісних властивостей сталей у процесі втомних випробувань за допомогою вимірювання швидкості поширення ультразвуку. Установлено можливість виявлення небезпечної стадії розвитку втомних ушкоджень на окремих деталях руйнування. На практиці варто враховувати, що наявність концентрації напруг знижує втомну міцність деталі. Конструюючи компресорну машину, варто прагнути до того, щоб кількість ділянок локальних напруг була зведена до мінімуму. Водночас для деталей, що працюють в умовах циклічних напруг, зовнішні обводи прагнуть зробити як можна більш плавними, радіуси заокруглення – більшими. Крім того, ще на стадії проектування деталей варто вибрати матеріал із заданими параметрами втомних характеристик.

2.1.2. Дослідження властивостей композиційних матеріалів промислового призначення з металевою матрицею

2.1.2.1. Вплив складу і способу виготовлення наповнювача на механічні властивості композиційного матеріалу

Для виготовлення композиційних матеріалів просоченням розплавом порошків краще застосовувати порошки, виготовлення яких освоєне для порошкової металургії. Становить інтерес дослідження наповнювачів із широко використовуваних залізних порошків на залізній основі. Дослідження показали, що механічні властивості композита з однокомпонентним наповнювачем із залізного порошку не можуть бути високими через гетерогенну структуру металу шва (табл. 2.1).

Застосування багатоконпонентного наповнювача, виготовленого з різно-рідних металів, дозволяє значно підвищити властивості композита в результаті зрощування, диспергації і сфероїдизації частинок. Наповнювач, що складається з 20 % великих частинок чистого нікелю і 80 % низьковуглецевої сталі, при взаємодії з розплавом латуні диспергується з утворенням дрібнодисперсних частинок в однорідному металі. Однак реалізація такого простого рішення із застосуванням промислових порошків виявляється складною. Так, для заповнення форми і прийнятної довжини переміщення розплаву придатні порошки з кулястою формою частинок розміром 0,1–0,4 мм. Такі порошки виготовляють розпиленням рідкого металу. Суміш із розпилених порошків має необхідні технологічні властивості – низьку газонасиченість, однорідність і плинність. Однак одержати високу ударну в'язкість композита із застосуванням розпиленого порошку нікелю неможливо (табл. 2.2).

Таблиця 2.1 – Механічні властивості композиційного металу з однокомпонентним наповнювачем

Наповнювач	Сплав матриці	Межа міцності σ_s , МПа	Ударна в'язкість a_n , Дж/см ²
Порошок залізний ПЖ6С	Cu-Zn	310	13
Порошок залізний ПЖ4С	Cu-Zn	300	14
Порошок залізний ПЖ3С	Cu-Zn	380	21
Порошок залізний ПЖ3С	Cu-Mn	390	27
Бій сталевий колотий ДСК	Cu-Zn	380	15
Порошок залізний розпорошений ПЖР	Cu-Zn	360	25
Дискретні волокна, сталь 20 Ø 0,3x1,5 мм	Cu-Zn	300	13
Те саме	Cu-Mn	270	3
Те саме	Cu-Mn-Ni	360	26

Таблиця 2.2 – Механічні властивості композиційного металу з наповнювачем із бінарної суміші порошків

Нікель, 20 %	Залізо, 80 %	Сплав матриці	Межа міцності σ_{σ} , МПа	Ударна в'язкість a_n , Дж/см ²
Карбонільний	ПЖЗС	Cu-Zn	380	18
Електролітичний	ПЖЗС	Cu-Zn	480	30
	Дискретні волокна, сталь 20	Cu-Zn	410	26
Дискретні волокна \varnothing 0,5x1	ПЖЗС	Cu-Zn	330	20
	Дискретні волокна, сталь 20	Cu-Zn	460	30
	Те саме	Cu-Mn-Ni	490	101
Розпилений, вихідний стан	ПРХН2 розпилений, вихідний	Cu-Mn-Ni	460	28
Те саме	ПРХН2 розпилений, відпалювання у Н ₂	Cu-Mn-Ni	460	50
Розпилене відпалювання у вакуумі	ПРХН2 розпилений, вихідний	Cu-Mn-Ni	460	32
	ПРХН2 розпилений, відпалювання в Н ₂	Cu-Mn-Ni	470	50
	ПРХН2 розпилений, відпалювання у вакуумі	Cu-Mn-Ni	460	27

На рисунку 2.6 показана структура металу, що містить розпилений порошок нікелю. Зниження механічних властивостей спричиняє значна пористість частинок розпиленого нікелю. Майже в кожній частинці нікелю розміром більше ніж 0,1 мм наявні одна або кілька пор. Після розчинення нікелю пори залишаються в металі. Відпалювання порошку нікелю у вакуумі не видаляє газ із пори і не усуває пористості металу. Пористість частинок є характерною рисою розпилених порошків із нікелю і сплавів на його основі, наприклад пермалою Ж50Н50. Як і в чистому нікелі, у кожній частинці сплаву є різні за величиною мікропори, що відбивається на ударній в'язкості металу (табл. 2.3).

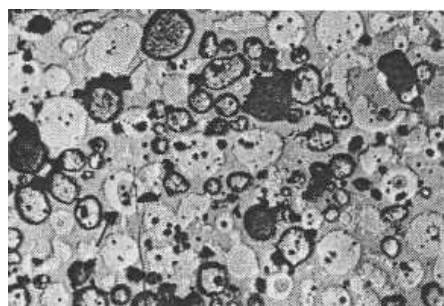


Рисунок 2.6 – Мікроструктура (x20) композиційного металу, сформованого просоченням сплавом Cu-Mn-Ni наповнювача із суміші розпилених порошків нікелю і сталі ХН2

Як бачимо з табл. 2.2 і 2.3, задовільна міцність композита досягається при різному сполученні нікелевих і залізних порошків у бінарному наповнювачі. Прийнятну ударну в'язкість металу забезпечують лише деякі речовини. Наповнювач із суміші порошків нікелю і розпиленого сталевого порошку ПРХН2 не забезпечує ударної в'язкості. Це пов'язано в основному з пористістю частинок нікелю і з окисненим станом поверхні частинок порошку ПРХН2. Залишковий кисень у застосовуваному для розпилення азоті обумовлює утворення на поверхні частинок оксидної плівки товщиною 400–500 Å. Через низький вміст вуглецю в порошок відновлення оксидів хрому при нагрі-

ванні до температури просочення не відбувається. Не усуває оксидної плівки відпалення порошку у вакуумі за температури 900 °С. Підвищення температури відпалення неприпустиме, оскільки призводить до спікання порошку. Ударна в'язкість металу з наповнювачем із відпаленого у вакуумі порошку ПРХН2 не досягає 30 Дж/см². Відпалення порошку ПРХН2 у водні відновлює оксидну плівку та підвищує ударну в'язкість до 50 Дж/см².

Таблиця 2.3 – Механічні властивості композиційного металу при просоченні сплавом Cu-Mn-Ni наповнювача із суміші порошків Ж50Н50 і ПРХН2

Стан і кількість порошку, %		Межа міцності σ_s , МПа	Ударна в'язкість a_n , Дж/см ²
Ж50Н50	ПРХН2		
Вихідний, 100	–	480	47
Вихідний, 80	Вихідний, 20	480	40
Вихідний, 50	Вихідний, 50	510	32
Відпалений у вакуумі, 50	Відпалений у Н ₂ , 50	520	50

Карбонільні, електролітичні та розпилені промислові порошки можна застосовувати для виготовлення спеченого наповнювача. Суміш залізного порошку з карбонільним або електролітичним нікелем при нагріванні в безкисневій атмосфері спікається в конгломерат, у розмелі якого утвориться порошок потрібної грануляції. Губчаста форма частинок із гострими виступами, неупорядкована кристалічна структура спеченого металу обумовлюють активну диспергацію наповнювача розплавом. Спечений наповнювач із суміші карбонільного або електролітичного нікелю і залізних порошків ПЖС, ПЖМ забезпечує ударну в'язкість композита більше ніж 150 Дж/см². Вплив способу виготовлення порошку в спеченому наповнювачі на властивості композиційного металу поданий у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Вплив вихідних матеріалів спеченого бінарного наповнювача з 25 % нікелевого та 75 % залізного порошку на механічні властивості композита при просоченні сплавом Cu-Mn-Ni

Нікелевий порошок	Залізний порошок	Межа міцності σ_s , МПа	Ударна в'язкість a_n , Дж/см ²
Карбонільний	ПЖЗС	600	32
	ПЖ4	480	20
	ПЖР	570	40
	ПЖОТ	580	38
	Електролітичне	570	20
	Карбонільне	600	56
Електролітичний	ПЖР	560	46
	Електролітичне	590	46
	Карбонільне	580	63

Таким чином, як показали експерименти, промислові порошки на основі заліза і нікелю малоприсадні як наповнювач. Високі механічні властивості за-

безпечує композиційний наповнювач, спечений із суміші 25 % карбонільного нікелю та 75 % карбонільного заліза. Однак виготовлення такого наповнювача пов'язане зі значними технологічними труднощами. Спикання суміші карбонільних порошків необхідно виконувати у вакуумі. При цьому відбуваються дегазація порошків, відновлення оксидів і з'єднання частинок у конгломерат. Температура спикання не повинна перевищувати 850 °С. При збільшенні температури спикання конгломерат стає пластичним і не розмелюється. При меншій температурі відбувається неповне спикання, і при розмелюванні утвориться значна кількість пилоподібної фракції.

При просоченні сплавом на мідній основі наповнювача НПС-3 проходять такі процеси. Наповнювач являє собою губчасті частинки, всередині яких містяться кулясті частинки порошку зі сталі ХН2. Спечені частинки дрібнодисперсних порошків нікелю й заліза, що перебувають на поверхні кулі, через недо-

сконалість структури швидко розчиняються в розплаві. У пересиченому розчині кристалізується фаза Fe-Ni-Cu-C. Кулясті частинки ХН2 як низьковуглецева складова наповнювача активно диспергуються на межах зерен під дією міді та нікелю, що дифундують із розплаву. Дисперговані частинки насичуються міддю, нікелем, вуглецем і набувають сфероїдальної форми. Процес диспергації та сфероїдизації

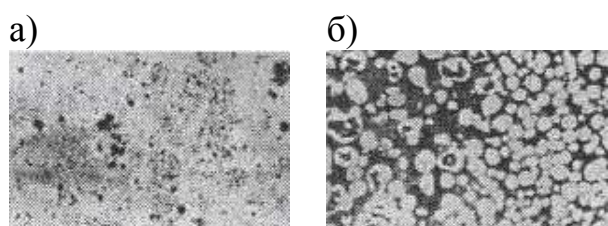


Рисунок 2.7 – Мікроструктура композиційного металу, сформованого пропиткою сплавом Cu-Mn-Ni-Y наповнювача НПС-3; а – x20; б – x200

наповнювача НПС-3 завершується впродовж 20–30 хв за температури 1 000 °С (рис. 2.7), забезпечуючи при цьому високі механічні властивості композита.

Вміст вуглецю в межах 0,05–0,15 % обґрунтований так. Незважаючи на те що безвуглецевий наповнювач диспергується припоєм із найбільшою швидкістю, у наповнювачі повинно бути не менше ніж 0,05 % вуглецю для відновлення оксидної плівки, що утворюється під час розпилення й на початкових стадіях нагрівання при просоченні. Марганець і кремній кількістю менше ніж 0,3 % є обов'язковими як технологічні добавки під час виплавлення порошку. У наповнювачі ці добавки небажані та повинні бути по можливості зведені до мінімуму, оскільки марганець знижує швидкість диспергації, а кремній може утворити тонкі прошарки в матриці шва. З таблиці 2.5 бачимо, що при застосуванні як шихти залізного порошку ПЖ, відновленого з окалини, розпилений порошок містить велику кількість кисню. Механічні властивості композита із застосуванням такого наповнювача невисокі. Ударна в'язкість металу перебуває в межах 30–50 Дж/см². Необхідні склад і властивості має розпилений наповнювач, виплавлений із шихти, що складається з якісної сталі 20. Наповнювач зазначеного в табл. 2.5 складу виготовляється за ТУУ-14-1-4409-88 розпиленням розплаву азотом. Марка наповнювача за ТУУ – ПРН-24. Характеристика порошку наповнювача наведена в табл. 2.6 і 2.7.

Таблиця 2.5 – Хімічний склад сплавів розпиленого залізонікелевого наповнювача, %

Хімічний склад, % ¹⁾								Примітка
C	O ₂	Ni	Mn	Si	S	P	N ₂	
0,05–0,15	< 0,06	21–25	< 0,3	< 0,4	< 0,03	< 0,03	< 0,03	За ТУ
0,04	0,18	24,6	0,04	0,05	0,01	0,01	0,01	Шихта ПЖ4С
0,04	0,15	23,8	0,02	0,07	0,02	0,03	0,04	Шихта ЕП620 і чавун
0,08	0,02	22,5	0,22	0,04	0,009	0,006	0,008	Шихта Сталь 20

Примітка: ¹⁾ залізо – інше

Таблиця 2.6 – Насипна вага і газовиділення у вакуумі 13 Па за температури 1 000 °С із порошку ПРН-24

Насипна вага, г/см ³	Газовиділення, см/г	% H ₂	% CO	% CO ₂
4,5	0,007	17	75	7

Таблиця 2.7 – Гранулометричний склад порошку ПРН-24

Розмір частинок, мкм	< 50	50–63	63–100	100–160	160–200	200–315	315–400
%	5	17,5	7,5	29	11	23	5

Придатними як наповнювач є частинки розміром 50–400 мкм. Частинки наповнювача ПРН24 щільні, пори трапляються лише у великій фракції – 315–400 мкм. Кількість пористих частинок становить 2–3 %. Наповнювач ПРН-24 не кородує в атмосферних умовах. Тривале зберігання може здійснюватися в герметичній упаковці, що захищає порошок від забруднень.

Механічні властивості композиційного металу, сформованого просоченням наповнювачів НПС3 і ПРН24, розроблених для такого методу, наведені в табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Механічні властивості композиційного металу, сформованого із застосуванням спеціальних залізонікелевих наповнювачів

Наповнювач	Сплав	Межа міцності σ_e , МПа	Ударна в'язкість a_u , Дж/см ²
ПРН-24	Cu-Zn	600	8
ПРН-24	Cu-Mn-Ni	610	ПО
НПС3	Cu-Mn-Ni	610	150
НПС3	Cu-Mn-Ni-Y	620	200

2.1.2.2. Вплив складу матриці на механічні властивості композиційного матеріалу

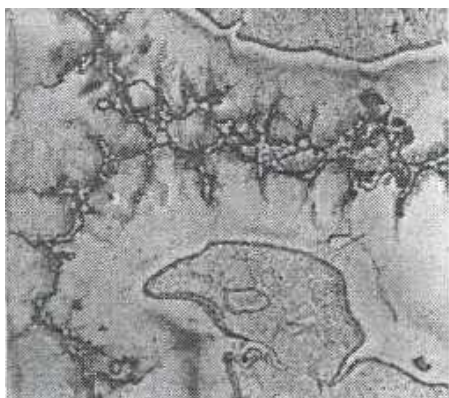


Рисунок 2.8 – Мікроструктура (x200) металу, сформованого просоченням наповнювача з низьковуглецевої сталі сплавом Cu-Mn, легованого Si, Na,

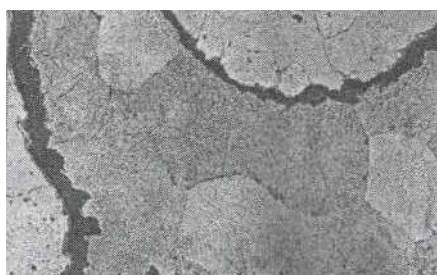


Рисунок 2.9 – Мікроструктура (x200) композиційного металу, сформованого просоченням наповнювача з низьковуглецевої сталі сплавом Cu-Mn

Просочення розплавом порошкового наповнювача як технологічний процес уявляється перспективним при застосуванні для нагрівання стандартного термічного устаткування, зокрема нагрівальних печей із робочою температурою в діапазоні 900–1100 °С. Такий діапазон температур забезпечують печі з недорогими й надійними ніхромовими нагрівачами. Із цієї причини становить інтерес застосування для просочення міді та сплавів на її основі двох систем Cu-Zn та Cu-Mn. На рисунку 2.8 показана структура металу, виконаного просоченням низьковуглецевого наповнювача припоєм системи Cu-Mn, який містить комплекс добавок, що флюсують. Ліквідаційні прошарки, що утворюються в матриці металу, роблять його значно крихкішим.

Бінарний сплав із умістом 62 % міді і 38 % марганцю становить інтерес як основа сплаву для просочення насамперед через порівняно низьку (870 °С) температуру плавлення. З ряду причин бінарний сплав, що являє собою твердий розчин, як метал для просочення залізного наповнювача застосовувати не можна. По-перше, з'єднання наповнювач-матриця зазнає інтенсивної ножевої корозії. По-друге, мідно-марганцевий сплав не стабільний при нагріванні до 400 °С. Перерозподіл Mn в γ -твердому розчині призводить до розшарування, фазового наклепу та окрихчування.

По-третє, під час кристалізації сплаву утворюється значна концентраційна неоднорідність. На рисунку 2.9 показана структура металу, виконаного сплавом Cu-Mn із наповнювачем із низьковуглецевої сталі. У прикристалізованому до металу шарі частинок наповнювача товщиною 5–15 мкм утримується до 70 % марганцю. Таке з'єднання стає крихким через відсутність ударної в'язкості.

На рисунку 2.10 бачимо, що при введенні нікелю в наповнювач у шарі, який закристалізувався на низьковуглецевій сталі, відсутній збагачений марганцем прошарок.



Рисунок 2.10 – Мікроструктура (x200) композиційного металу, сформованого просоченням наповнювача із суміші нікеля і низьковуглецевої сталі сплавом Cu-Mn

Механічні властивості з'єднання значно підвищуються. Однак матриця металу грубозерниста, хімічно неоднорідна та з грубими межами зерен у ліквідаційній зоні.

Відомо, що мікролегування рідкоземельними елементами істотно змінює структуру та властивості металів. Невелика кількість ітрію, який діє як розкислювач і модифікатор, очищає межі зерен, коагулює карбіди, подрібнює зерно в чавуні, сталях і сплавах, підвищуючи їх механічні властивості. Ітрій позитивно впливає й на сплав Cu-Mn, що становить матрицю металу. Ітрій вводили в сплав при його виплавлянні через лігатуру CuY і SiY. У таблиці 2.9 наведені результати випробування ударної в'язкості металу, сформованого просоченням наповнювача із суміші 20 % нікелю і 80 % низьковуглецевої сталі сплавом Cu65Mn35, легованим ітрієм.

Таблиця 2.9 – Вплив вмісту ітрію в мідно-марганцевому сплаві на ударну в'язкість композиційного металу

Вміст ітрію, %	–	0,008	0,016	0,032	0,064	0,128
Ударна в'язкість, Дж/см ²	63	95	92	104	106	68

Матриця металу, виконаного сплавом $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_6$ із залізонікелевим наповнювачем, являє собою твердий розчин, що містить елементи наповнювача. Залежно від складу і форми частинок наповнювача, а також від температури та часу витримки насиченість матриці елементами наповнювача може бути різною.

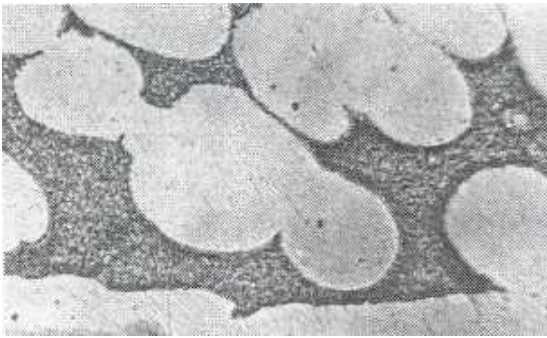


Рисунок 2.11 – Мікроструктура (x800) металу, виконаного просоченням сплавом $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_6$ залізонікелевого наповнювача після ізотермічної витримки 60 хв за температури просочення

Практично у всіх випадках під час охолодження після просочення насичений твердий розчин матриці підлягає дисперсійному розпаду з виділенням дрібнодисперсних частинок розміром 1–2 мкм. При застосуванні залізонікелевого наповнювача дрібнодисперсні частинки, що виділилися з твердого розчину, мають такий склад, %: 44–51 Cu, 21–22

Mn, 17–22 Fe, 10–11 Ni. Тривала ізотермічна витримка залізонікелевого наповнювача в легованому нікелем мідно-марганцевому розплаві приводить, як показано вище, до диспергації та сфероїдизації наповнювача. У цьому випадку досягається однорідність металу матриці.

Вона являє собою твердий розчин складу, %: 56–60 Cu, 22–26 Mn, 7–9 Ni і 7–10 Fe, дисперсійно-зміцнений частинками, що виділилися з розчину, розміром 1–2 мкм (рис. 2.11).

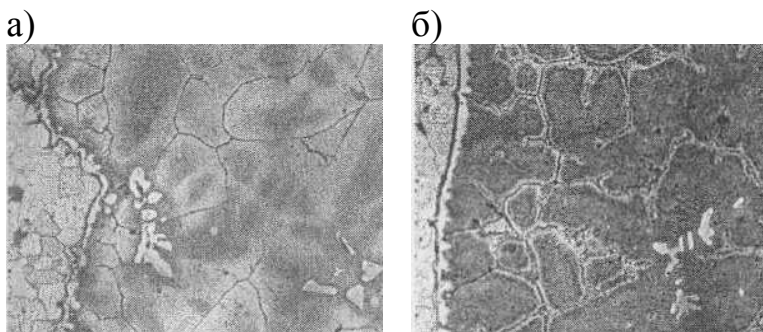


Рисунок 2.12 – Мікроструктура (x200) металу матриці, виконаного сплавом $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_6$: а) без кремнію; б) з 0,7 % кремнію

Особливого розгляду потребує легування сплаву системи Cu-Mn-Ni. Досліджений вплив добавок кремнію, хрому і срібла на структуру сплаву $\text{Cu}_{64}\text{Mn}_{30}\text{Ni}_6$. Кремній кількістю 0,2–0,65 % практично не впливає на зміну його твердості, але сприяє поліпшенню процесу плавлення під флюсом. Зі збільшенням кількості кремнію до 1–2 % підвищується твердість структурних складових. Основна складова структури – дендрити, що мають склад, %: 69 Cu, 27 Mn, 3 Ni, 0,2 Si, а міждендритний прошарок, що облямовує, має такий склад, %: 40 Cu, 36 Mn, 7 Ni, 0,56 Si, мікротвердість складових дорівнює 130 і 270 $\text{H}_{\text{V}20}$ відповідно. Однак і в невеликих кількостях кремній істотно впливає на властивості металу. На рисунку 2.12 показана структура металу композита. У металі, що містить кремній, на межах зерен кристалізується прошарок із підвищеним його вмістом. Термічне оброблення металу спричиняє випадання з твердого розчину дрібнодисперсних частинок із підвищеним умістом кремнію. Загалом

вплив кремнію на механічні властивості металу негативно та істотно проявляється при його вмісті у сплаві більше ніж 0,4 %.

Уведення в сплав срібла до 1 % не підвищує пластичних властивостей металу. При випробуваннях на ударну в'язкість він руйнується крихко. Для забезпечення міцності металу композита більше 600 МПа при ударній в'язкості > 50 Дж/см² розроблений сплав на мідно-марганцевій основі з легуванням Ni, Mo, Zn, Y. Деякі дані про вплив легування сплаву Cu-Mn-Ni молібденом і цинком на механічні властивості металу, виконаного просоченням залізонікелевого наповнювача грануляції 0,16–0,40 мм, наведені в табл. 2.10.

Таблиця 2.10 – Вплив легування сплаву Cu-Mn на температуру плавлення і механічні властивості композита

Вміст легувальних, %			Температура просочення, °С	Межа міцності, МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²
Ni	Zn	Mo			
2	–	–	980	470–490	15–17
3	–	–	980	500–520	19–21
6	–	–	1 000	540–560	29–32
7	–	–	1 040	550–580	30–36
5	1,0	–	1 000	550–560	42–48
5	3	–	1 000	550–580	82–97
5	4,0	–	1 000	550–570	83–96
5	5,0	–	1 000	520–530	83–95
5	6,0	–	980	510–520	81–97
5	7,0	–	980	490–500	80–95
5	–	1,0	1 000	580–590	29–36
5	–	2,0	1 020	630–640	33–41
5	–	3,0	1 050	630–650	48–65
5	–	4,0	1 080	640–650	51–65
5	1,5	1,5	1 000	630–640	56–63
5	3,0	1,5	1 000	630–640	62–65
5	5,0	3,0	1 000	630–640	67–69

Сплав складу, %: Cu – основа, Mn – 30–40; Ni – 5–6; Mo – 1,2–3,0; Zn – 1,2–3,0; Y – 0,05–0,1, рекомендований для промислового застосування. Сплав виплавляється в індукційній або печах електроопору із застосуванням магнетитових, графітових та алундових тиглів. Виплавляння відбувається в інертному середовищі або під шаром високофтористого флюсу АНМ-10, що містить, %: 70 NaF, 20 SF₂, 10 LiF. Розплав кристалізують у виливниці з графіту або чавуну та застосовують у вигляді прутків. Характеристика сплаву в литому стані така: σ_m – 330–340 МПа, σ_g – 530–550 МПа, δ – 38–40 %, ψ – 32–35 %, ρ – 7,95 г/см³.

Механічні властивості композиційних матеріалів, сформованих просоченням залізонікелевих наповнювачів ПНСЗ ПРН-24 сплавами на основі Cu-Mn-Ni, легуваними різними технологічними добавками, наведені в табл. 2.11. Коефіцієнт термічного розширення та його залежність від температури композиційного металу, сформованого при просоченні наповнювача

ПРН-24 сплавом Cu-Mn-Ni-Zn, наведені в табл. 2.12. Для порівняння в таблиці наведений коефіцієнт термічного розширення сталі 20.

Таблиця 2.11 – Механічні властивості композиційного металу, сформованого просоченням залізонікелевих наповнювачів легованими сплавами Cu-Mn-Ni

Наповнювач	Припій	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	НВ
ПРН-24	Cu64Mn30Ni6	260	490	36	46	100	145
НПС-3	Cu64Mn30Ni6	310	520	26	54	155	170
ПРН-24	Cu63Mn30Ni5Mo	310	560	25	44	103	164
ПРН-24	Cu63Mn30Ni5Zn	290	550	31	60	123	164

Таблиця 2.12 – Коефіцієнт термічного розширення композиційного металу і сталі 20, $\alpha - 10^6$ мм/°С

T, °C	100	200	300	400	500	600	700	800
Сталь 20	11,9	12,4	13,0	13,3	14,1	14,6	14,8	15,2
Композит	18,4	18,7	18,9	19,2	19,8	19,9	20,3	20,8

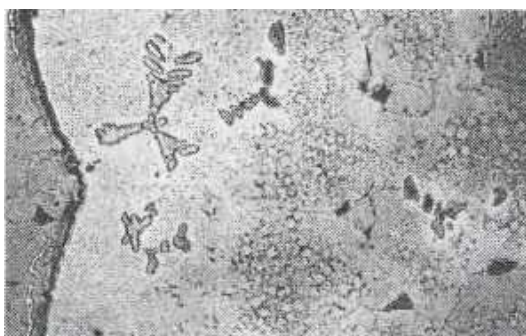


Рисунок 2.13 – Мікроструктура (x200) металу матриці, виконаного сплавом Cu-Zn за температури 960 °C з витримкою 30 хв

Промисловість виготовляє велику кількість різноманітних припоїв системи Cu-Zn. Латунні припої під час взаємодії з наповнювачем на залізній основі формують різноманітну, зокрема й дрібнозернисту, однорідну структуру із задовільною міцністю. Однак ударна в'язкість металу не перевищує 50 Дж/см². Причину цього варто шукати в особливості будови з'єднання наповнювач-матриця. При взаємодії розплаву латуні зі сталлю залізо обмежено розчиняється в латуні, а при кристалізації випадає з розчину у вигляді променистих дендритів (рис. 2.13).

Дендрити, що випали з розчину заліза (див. рис. 2.13), не знижують міцності та пластичності матриці. Руйнування з'єднання наповнювач – матриця відбувається на спаї. Ймовірною причиною окрихчування спаю є особливість будови діаграми Fe-Zn. Розчинність цинку в γ -Fe за температури 1 000 °C досягає 5,7 %, в α -Fe розчинність цинку максимальна при 780 °C і досягає 43 %, а за нормальної температури знижується до нуля. Розпад твердого розчину в дифузійній зоні під час охолодження призводить до окрихчування спаю.

2.1.2.3. Композиційні матеріали для плакування поверхні сталі

Просоченням розплавом металу порошків, розміщених на поверхні металу, можна формувати наплавлення з необхідними властивостями. Для формування композиційного металу в наплавленому шарі придатні різноманітні порошки, застосовувані як наплавні матеріали при плазмовому напилюванні.

Характеристика композиційного плакованого шару, сформованого просоченням розплавом різних сплавів деяких промислових порошкових наплавних матеріалів, наведена в табл. 2.13.

Таблиця 2.13 – Характеристика композиційного зносостійкого корозієстійкого наплавлення

Наповнювач	Матриця	Температура просочення, °С	Структура	Макротвердість	Швидкість корозії, мм/рік
Стеліт АН 35 ПР-КХ30Н2ВР сферичний	Ni-Cr-Si-B ПХ17Н70С12Р	1 190	Рівноважна матриця з диспергованим наповнювачем	50–52 HRC	0,03
Стеліт АН34 ПР-КХ30Н6ВСР сферичний	Ni-Cr-Si-B ПХ17Н70С12Р	1 190	Рівноважна матриця з диспергованим наповнювачем	54–56 HRC	0,04
Реліт WC мелений, кристалічний	Ni-Si-B	960	Рівноважна матриця із частково не розчиненим наповнювачем	900–970 HV	0,28
Реліт WC мелений, кристалічний	Ni-Cr-Si-B	980	Рівноважна матриця з карбідним зміцненням	870–950 HV	0,20
Реліт WC мелений, кристалічний	Ni-Co-Cr-W-Si-B-C	1 080	Рівноважна матриця з карбідним зміцненням	1 250–1 300 HV	0,17
Сплав ЦН-12 10Х18Н8С5М3Г2 ДР сферичний	Ni-19Cr-9Si-5Mn	1 120	Диспергований наповнювач у γ -розчині Ni	38–42 HRC	0,11

Для формування композиційного металу наплавлення як матриці застосовують промислові компактні або порошкові наплавні матеріали типу колмоной. Якщо є потреба, виплавляють метал матриці необхідного складу. Для специфічних умов експлуатації, наприклад для металевих ущільнень кульових кранів, що працюють у сірководневому середовищі за підвищеної температури, розроблена композиція наповнювач – матриця на основі кобальту. Наповнювач на основі кобальту (сплав № 1) має температуру плавлення більше 1 400 °С, а матриця (сплав № 2) – 1 140 °С. Для металевих ущільнень на підкладці зі сталі 12Х18Н10Т розроблена композиція на основі нікелю (сплав № 3) з температурою плавлення 1 120 °С. Хімічний склад і властивості композиційних наплав-

лень наведені в табл. 2.14.

Досліджували композиційні сплави, сформовані при просоченні у вакуумі за температури $(1\ 190 \pm 10)^\circ\text{C}$ порошків ЦН12 або АН36 розплавом Х17Н70С12Р (П14). Хімічні склади сплавів ЦН12, АН36, П14 і композиційних металів, сформованих із цих сплавів, подані в табл. 2.15.

Таблиця 2.14 – Склад і властивості технологічних сплавів для композиційного наплавлення

Сплав	Вміст елементів, вага, %									Твердість HRC	°C
	Cr	Si	B	C	W	Ti	Fe	Co	Ni		
Наповнювач № 1	28– 32	1,5– 2,5	0,01– 1,0	0,7– 1,7	4,0– 5,0	–	0,01– 3,0	зал.	3,0– 8,0		1450– 1470
Матриця № 2	18– 19	11– 12	0,9– 1,1	–	–	1,2– 1,3	2,7– 3,3	зал.	–		1140– 1150
№ 1 + 2 наплавлення	23– 26	6,0– 7,0	0,5– 1,0	0,3– 0,9	2,0– 2,5	0,6– 0,7	1,5– 3,5	зал.	2,0– 4,0	55–60	
Матриця № 3	16– 18	11– 13S	0,4– 1,0	0,1– 0,8	–	–	–	–	зал.		1120– 1140
№ 1 + 3, наплавлення	21– 26	7,0– 8,0	0,3– 0,5	0,7– 1,0	2,0– 2,5	–	–	26– 30	зал.	50–55	

Таблиця 2.15 – Хімічний склад матеріалів для композиційного матеріалу наплавлення

Марка сплаву	Вміст елементів, вага, %									
	Fe	Ni	Cr	C	Si	Mn	Mo	Nb	Cu	B
АН36	58–65	7,5– 9,0	17–19	0,05–,15	5–6	2–3	2,5–3,5		0,4– 0,8	0,05–0,4
ЦН12	54–66	6,5– 9,5	15–18	0,08– 0,15	4–5	3–5	4,5–6,5	0,5–1,2		
П14	3,8– 4,5	63–68	16–18	0,05– 0,08	11–13	–				0,8–1,0
Композит ЦН12 + Ш4	29–35	35–38	15–18	0,06– 0,11	7,7–9	1,5– 2,5	2,25– 3,25	0,25– 0,6		0,4–0,5
Композит АН36 + Ш4	31–35	35–38	16–18	0,05– 0,11	8,3– 9,5	1,0– 1,5	1,25– 1,75		0,4– 0,5	0,03–0,2

Взаємодія розплаву матриці П14 і порошку наповнювача ЦН12 за температури $1\ 190^\circ\text{C}$ приводить майже до повного розчинення наповнювача й утворення багатофазної структури. У пересиченому твердому розчині матриці з мікротвердістю $340\text{--}350\ \text{HV}_{50}$ (світла фаза на рис. 2.14) рівномірно розподілені інтерметалідні утворення з мікротвердістю $1\ 050\text{--}1\ 140\ \text{HV}_{50}$ усередині глобул із твердого розчину з твердістю $500\text{--}630\ \text{HV}_{50}$ (темна фаза структури). Сумарне співвідношення об'єму матриці і твердих складових структури обумовлює макротвердість плакувального шару $300\text{--}320\ \text{HV}$, що незначно перевищує твердість основного металу ($250\text{--}270\ \text{HV}$) (рис. 2.15) при зміні відстані від зовніш-

ньої поверхні шару (S).

У структурі наплавлення між основним металом і плакувальним шаром утворився прошарок зі змінною мікротвердістю в межах 270–340 HV₅₀. Зерна основного металу, що прилягають до прошарку, мають стовщені межі з підвищеною травимістю (рис. 2.14 а, б).

Під час випробування наплавлення у вихідному стані на міжкристалітну корозію виявлена інтенсивна корозія плакувального шару. Прошарок при цьому не зазнає корозійного руйнування. Основний метал кородує незначно (рис. 2.16 а). У дифузійній зоні основного металу, що прилягає до прошарку спаю, ножової корозії не відбувається (рис. 2.16 б). Поверхня плакувального шару руйнує корозійне середовище на глибину до 100 мкм (рис. 2.16 в).

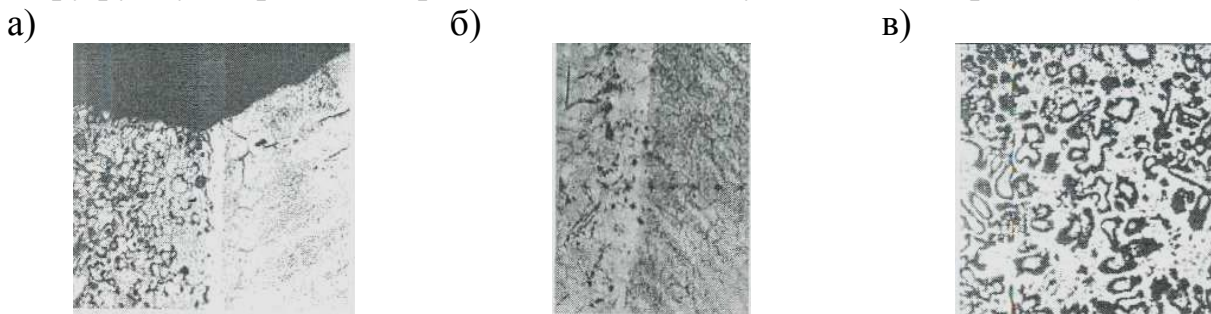


Рисунок 2.14 – Мікроструктура (x100) плакувального шару з композиційного металу ЦН12 + П14 на сталі 10X17Н13М2Т у стані після наплавлення: а) перехідна зона (спай); б) мікротвердість у зоні спаю; в) плакувальний

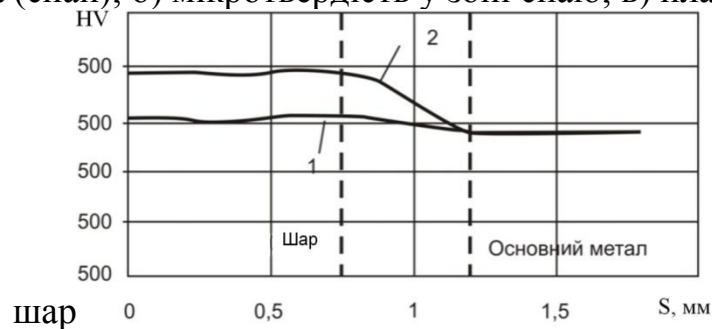


Рисунок 2.15 – Твердість плакувального шару з композиційного металу ЦН12 + П14 на сталі 10X17Н13М2Т у стані після наплавлення (1) і загартування (2)

Загартування наплавлення з 1 000 °С у воді істотно змінює структуру біметалу. Структура плакувального шару складається в основному з однорідного твердого розчину з мікротвердістю 490–520 HV₅₀, на межах зерен якого випадають голкоподібні кристали боридів і силіцидів (рис. 2.17). Макротвердість плакувального шару становить 390–400 HV. Твердість перехідного шару в спаї становить 270–340 HV. Необхідно зазначити, що, незважаючи на наявність істотних відмінностей структури і фізичних властивостей плакувального шару основного металу, руйнування біметалічної конструкції при загартуванні у воді не відбувається.

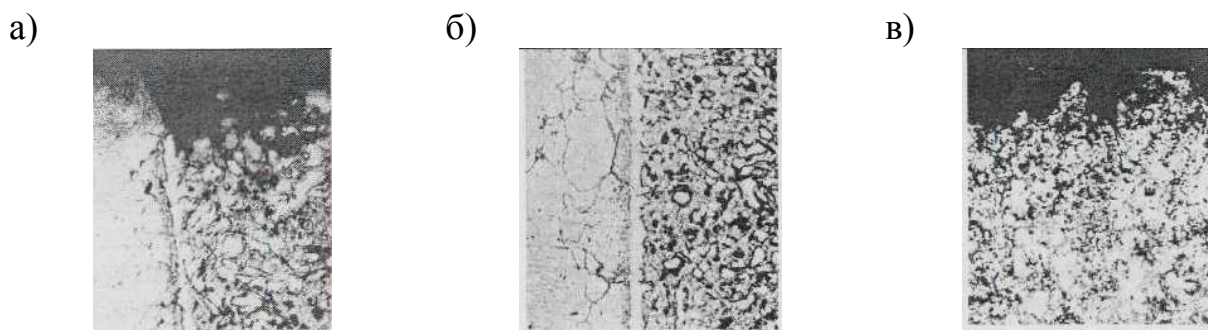


Рисунок 2.16 – Мікроструктура (x100) плакувального шару з композиційного металу ЦН12 + П14 на сталі 10X17H13M2T після випробувань на міжкристалітну корозію: а) поверхня в зоні спаю; б) основний метал і наплавлення в зоні спаю; в) на поверхні плакувального шару

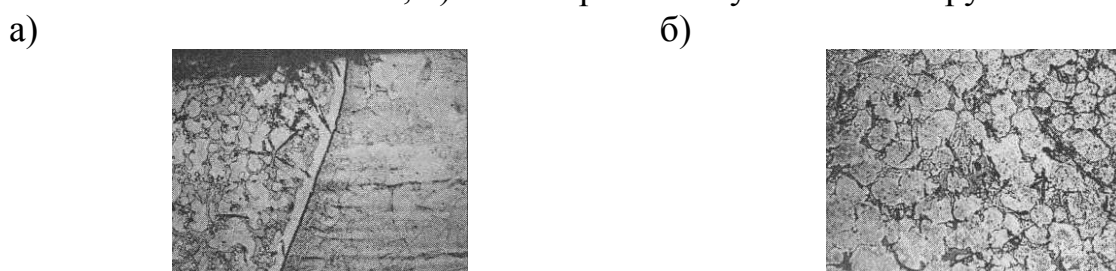


Рисунок 2.17 – Мікроструктура (x100) плакувального шару з композиційного металу ЦН12 + П14 на сталі 10X17H13M2T після випробувань на міжкристалітну корозію в стані після загартування: а) на поверхні перехідної зони; б) плакувальний шар

Під час випробування наплавлення після загартування на міжкристалітну корозію корозійного руйнування складових структури біметалу – плакувального шару спаю, дифузійної зони та основного металу не виявлено (рис. 2.17 а). На межах зерен у дифузійній зоні дрібнодисперсні карбідні та боридні утворення, що мали місце в структурі після наплавлення, перейшли у твердий розчин основного металу, і межі в дифузійній зоні не відрізнялися від меж в основному металі (рис. 2.17 б).

Плакувальний шар у наплавленні з композиційного залізонікелевого сплаву має високу технологічність під час механічного оброблення. При токарському обробленні спеціальним твердосплавним інструментом і подальшим шліфуванням забезпечується висока чистота поверхні, необхідна в ущільненні «метал по металу».

2.1.3. Застосування композиційних матеріалів із металевою матрицею в деталях і вузлах компресорів

2.1.3.1. Композиційні метали в нерознімних з'єднаннях

Зварювання і високотемпературне паяння є традиційними методами створення нерознімних з'єднань. Однак у ряді випадків для створення надійного з'єднання в оригінальній конструкції застосування зварювання або паяння утруднене. Причиною цього може бути складність виконання зварювання або недостатня міцність і пластичність паяного з'єднання. Уявляється доцільним формування нерознімного з'єднання із застосуванням композиційного металу як елемента. Такий процес за технологічною сутністю більш близький до високотемпературного паяння.

Одна з типових схем підготовки з'єднання композиційним металом наведена на рис. 2.18. Дозовану наважку наповнювача розміщують на дні заглиблення в одній із деталей. Шар наповнювача забезпечує необхідний розмір зазору при розміщенні іншої деталі на наповнювачі. Кільцевий зазор устанавлюють за допомогою центрувального пристрою і заповнюють наповнювачем. Дозовану наважку металу матриці поміщають у технологічній порожнині. Розплав матриці просочує шар наповнювача, витісняючи з нього газу, і підживлює композиційний метал, що кристалізується. За такою схемою з'єднують заготовки сталевих трійників, відводів, кутів арматур високого тиску компресорних установок (рис. 2.19).

Складання, центрування, дозування наповнювача і металу матриці виконують на спеціальній установці (рис. 2.20). Взаємне положення деталей і наповнювач у зазорі фіксують сполучним розчином. Склади суміші застосовуваних розчинів наведені в табл. 2.16. Після випарювання розчинника положення компонентів з'єднання фіксується зв'язувальною речовиною. Для прискорення процесу випарювання на стенді складання застосовують нагрівання інфрачервоними випромінювачами (рис. 2.21). Під час нагрівання у вакуумі зв'язувальна речовина сублимує за температури 350–400 °С, а взаємне розміщення наповнювача деталей утримується адгезійними силами і дифузійним з'єднанням у контактах поверхонь.

У разі якщо немає можливості розмістити метал матриці в технологічній порожнині, його розміщують у вигляді кілець, стрічки, відрізка дроту або валика з порошку поряд із зазором, заповненим наповнювачем. При цьому передбачають дренажні канали для витіснення із зазору газів при переміщенні розплаву в наповнювачі.

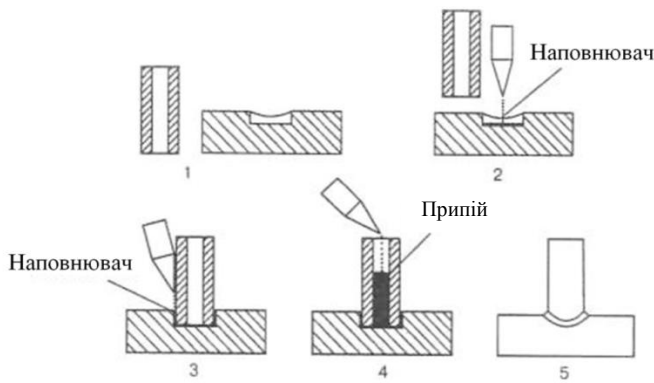


Рисунок 2.18 – Схема складання деталей для з'єднання просоченням розплавом наповнювача в широкому зазорі: 1 – деталі перед складанням; 2 – заповнення стикової частини з'єднання наповнювачем; 3 – заповнення телескопічної частини наповнювачем; 4 – заповнення технологічної порожнини металом матриці; 5 – вузол після просочення



Рисунок 2.19 – Трійники та кути високого тиску зі сталевих штампувань (а) і прокату (б) з нерознімним з'єднанням просоченням наповнювача в широкому зазорі



Рисунок 2.20 – Установа складання деталей заготовок трійників для з'єднання просоченням наповнювача в широкому зазорі



Рисунок 2.21 – Стенд складання деталей заготовок трійників для з'єднання просоченням наповнювача в широкому зазорі

Під час застосування автовакуумного нагрівання для просочення наповнювача в широкому зазорі передбачаються герметизація зварюванням периметра шва, видалення газів сорбентом і подавання розплаву з допоміжної камери. Одна зі схем формування нерознімного з'єднання подана на рис. 2.22.

Таблиця 2.16 – Склади розчинів для закріплення наповнювача

Найменування в'язучого	Найменування і склад (%) розчинника	Вміст в'язучого в розчині, вага, %
Сополімер бутилового ефіру метакрилової смоли БМК-5 ОСТ 6-01-26-75	Р-5 Держстандарт 7827-74	5
	Р-649 ТУ 6-10-1358-78	
	Ксилол 40, Держстандарт 9949-78, Ацетон 30, Бутилацетат 30, Держстандарт 8981-78	
БМК-5	Р-5 або Р-649	10
Етилцелюлоза ТУ 6-53-52-91	Ксилол 80, Спирт етиловий 15, Бутанол 5, Держстандарт 6006-78	15
Сополімер ТБМ-60 ТУ 6-01-737-85	Бутилацетат	25

За такої схеми метал матриці, перебуваючи в технологічній порожнині усередині деталі, розплавляється після нагрівання всієї збірки до температури просочення і відповідно після видалення сорбентом газу із зазору. Залишкові, не поглинені сорбентом, гази розплав матриці витісняє в технологічну порожнину із сорбентом. При охолодженні розплав підживлює метал з'єднання і кристалізується останнім. За такою схемою виконують з'єднання заготовок сталевих циліндрів компресорів високого тиску (рис. 2.23).

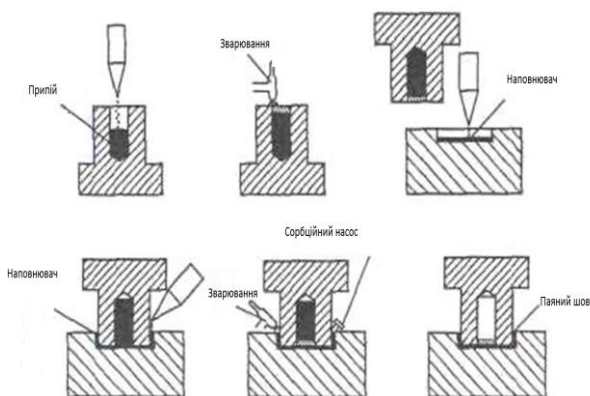


Рисунок 2.22 – Схема складання деталей для з'єднання просоченням при автовакуумному нагріванні



Рисунок 2.23 – Заготовки сталевих циліндрів компресорів, складені для з'єднання просоченням наповнювача при автовакуумному нагріванні

2.1.3.2. Композиційний метал у жолобниках таврових з'єднань

У металевих конструкціях, що зазнають вібраційних навантажень, значна увага приділяється концентраторам напруг, які істотно впливають на втомну міцність різного виду з'єднань. У тавровому з'єднанні місцем концентрації напруг є сполучення полиці та стінки тавра. Наявність у конструкції різких переходів, пазів, отворів призводить до місцевого підвищення внутрішніх напру-

жень. Однією з основних характеристик концентрації напруг є так званий теоретичний коефіцієнт напруг K , під яким розуміють відношення величини внутрішньої напруги в якій-небудь точці за наявності концентратора до напруги в тій самій точці та за його відсутності.

Радіус жолобника можна розраховувати за формулою

$$K = 1 + 0,4 \sqrt{\frac{2S - k}{R}},$$

де K – коефіцієнт концентрації напруг; S – товщина стінки тавра, мм; k – висота радіусного сполучення, мм; R – радіус жолобника, мм.

Перетворюючи залежність і беручи $K = 1$, а також $k = R$, одержимо, що $R = 2S$.

Конструкція, в якій витримане співвідношення $R = 2S$, дозволяє одержувати рівномірне таврове з'єднання в будь-якій точці. Таврове з'єднання з необхідними розмірами жолобника можна виконати зварюванням. Однак є конструкції відповідального призначення, що зазнають вібраційних навантажень, у яких виконання таврових з'єднань зварюванням утруднене.

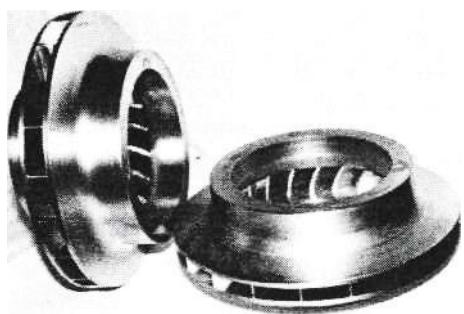


Рисунок 2.24 – Зовнішній вигляд робочих коліс ВКМ

Прикладом такої конструкції є робоче колесо відцентрового компресора. Закрите робоче колесо відцентрової компресорної машини (ВКМ) є основним вузлом ротора, що визначає надійну роботу компресора при високому вібраційному навантаженні. Колесо складається з основного та покривного дисків, з'єднаних між собою лопатками (рис. 2.24).

Для підвищення конструктивної втомної міцності паяних коліс до рівня основного металу необхідно збільшити розмір радіуса жолобника таврового з'єднання приблизно до 5–7 мм.

Одержати в тавровому з'єднанні такий великий жолобник можна, попередньо сформувавши його з металевого порошку. Для цього в куті з'єднання з одного або обох боків тавра при складанні формують із пасти жолобник із необхідними, за умовами рівномірності, формою та розмірами (рис. 2.25).

Одержати в тавровому з'єднанні такий великий жолобник можна, попередньо сформувавши його з металевого порошку. Для цього в куті з'єднання з одного або обох боків тавра при складанні формують із пасти жолобник із необхідними, за умовами рівномірності, формою та розмірами (рис. 2.25).

а)

б)

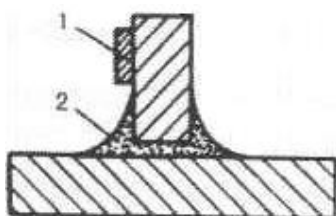


Рисунок 2.25 – Схема формування таврового з'єднання з композиційного металу (а) і макрошліф з'єднання (б): 1 – розміщення металу матриці перед просоченням; 2 – жолобник із наповнювача перед просоченням

При формуванні жолобника з порошку наповнювача його кількість можна визначити за формулою

$$Q_n = SLq,$$

де Q_n – вага наповнювача, г; S – переріз кутового шва, см; L – довжина кутового шва, см; q – насипна вага наповнювача, г/см.

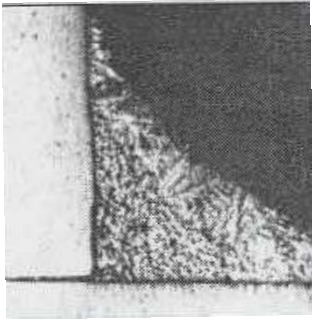


Рисунок 2.26 – Мікроструктура (x10) жолобника тавра при надлишку металу матриці

При довжині шва $L = 1$ см і трикутній формі жолобника з катетом K см необхідна така кількість наповнювача, г: $Q_n = 0,5K^2q$. Для просочення кутового шва довжиною 1 см необхідно металу матриці, г, $Q_{np} = 1,1Q_n$.

Такої кількості металу матриці достатньо для формування щільного металу з'єднання і заповнення капілярних зазорів між стінкою та полицею тавра. При збільшенні кількості металу матриці його надлишок кристалізується на поверхні жолобника, утворюючи великодендритну шорсткуватую поверхню (рис. 2.26).

Точне дозування металу просочувального сплаву забезпечує якісне формування з'єднання із гладкою поверхнею та ідеальним сполученням поверхні жолобника та елементів тавра (рис. 2.27). Метал матриці перед просоченням розміщують на одному боці тавра для того, щоб забезпечити можливість витіснення розплавом залишкових газів із лабіринту капілярних каналів жолобника.

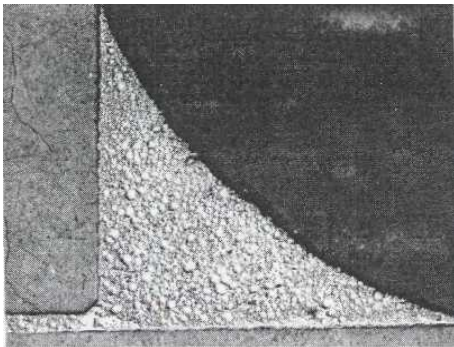


Рисунок 2.27 – Мікроструктура (x20) таврового з'єднання з жолобником із металевим композиційного металу

Пасту з наповнювача розміщують в зазорі між стінкою та полицею для того, щоб розплав міг переміститися на інший бік тавра. Ця обставина усуває необхідність великої точності сполучення поверхонь, що паяються, при складанні. Розмір зазору може бути різним.

Для проектування таврового з'єднання необхідні відомості про композиційний метал жолобника – його міцність, в'язкість, твердість, а також про технологічну характеристику – довжину переміщення розплаву в порошок наповнювача. Ці відомості одержані при просоченні різними розплавами порошків наповнювачів в алундовій виливниці довжиною 150 мм під час нагрівання у вакуумі.

Композиційний метал випробовували на розтягання, кут вигину і твердість. Результати випробувань наведені в табл. 2.17.

Результати випробувань свідчать, що таврове з'єднання з великим жолобником з композиційного металу може бути застосоване для з'єднання лопаток і дисків робочих коліс із забезпеченням втомної міцності на рівні основного металу. При цьому рівноміцність з'єднання з основним металом забезпечується недорогими сплавами на мідній основі. Істотним є й те, що рівноміцність забезпечує сплав системи Cu-Mn-Ni з температурою просочення 1 000–1 050 °С. Необхідно зазначити, що при термічному обробленні таврового з'єднання з великим жолобником структура і властивості композиційного металу жолобника істотно не змінюються. Відомості про міцність, зокрема і втомну, таврових з'єд-

нань із великим жолобником різних сталей, виконаних сплавом системи Cu-Mn-Ni, наведені в табл. 2.18.

Таблиця 2.17 – Властивості композиційного металу жолобника тавра

Сплав матриці	Наповнювач		Довжина просочення, мм	Механічні властивості		
	марка	грануляція, мкм		Кут вигину, °	межа міцності, МПа	твердість, НВ
Cu-MO	1X1H2	50–100	100	180	540	180
	ПРН24		150		544	140
	Ж50Н50		120		535	130
Cu-Ni-Si	1X1H2	< 50	120	180	620	212
		50–100	150		660	244
		100–200			640	240
	ПРН24	< 50	150		610	234
		50–100			635	240
		100–200			620	212
	Ж50Н50	50–100	150		610	207
		100–200			600	210
Cu-Ni	1X1H2	50–100	150	180	610	212
	ПРН24				610	224
	Ж50Н50				600	212
Cu-Mn-Ni	1X1H2	50–100	150	180	590	160
	ПРН24				610	150
	Ж50Н50				610	140
Mn-Ni	1X1H2	50–100	130	80	590	270
	ПРН24			100	630	280
	Ж50Н50			90	620	290
Ni-Cr-Si-B	1X1H2	50–100	110	50	650	312
	ПРН24		120	60	680	340
	Ж50Н50		120	40	670	330

Таблиця 2.18 – Механічні властивості таврового з'єднання з великим жолобником із композиційного металу при просоченні залізонікелевого наповнювача сплавом Cu-Mn-Ni

Сталь тавра	Розмір жолобника, мм		Межа міцності, МПа	Межа втоми, МПа
	катет	радіус		
Сталь 20	3	3	450	130
Сталь 40	4	4	580	210
14X2ГМР	5	5	610	230
20X13	5	5	780	390
07X16H6	5	5	1160	430

Примітка: 1) товщина стінки тавра 5 мм; 2) випробування на втому при розтягуванні; 3) руйнування таврового з'єднання в усіх випадках відбулося за основним металом

Як бачимо з табл. 2.18, рівноміцність таврового з'єднання з основним металом у сталях із невисокою межею міцності досягається при розмірах жолобника менше 5 мм, оскільки метал жолобника, виконаний сплавом Cu-Mn-Ni з наповнювачем ПРН24, має такі самі механічні властивості, як і низьколеговані

сталі: $\sigma_s = 600$ МПа, $\sigma_m = 290$ МПа, $\delta = 24$ %, $\psi = 53$ %, $KCU = 85$ Дж/см², твердість – 52 НВ. Таврові з'єднання із великим жолобником з композиційного металу придатні не лише для робочих коліс компресорів, а й для інших конструкцій із більшою кількістю важкодоступних для зварювання таврових швів, що працюють при динамічних навантаженнях, таких як робочі колеса насосів і гідравлічні муфти (рис. 2.28).

2.1.3.3. Композиційний матеріал у плакованих сталевих деталях

Застосування плакування деталей матеріалом з особливими властивостями дозволяє створювати конструкції необхідної міцності, надійності та довговічності. Прикладом такої конструкції є кульовий кран з ущільненням «метал по металу» (рис. 2.29), в якому основні деталі – міцна сталева кульова пробка та ущільнювальні кільця – покриті зносостійким корозієстійким шаром, що забезпечує тривалу роботу в корозійному абразивному середовищі за високих температур і тиску.



Рисунок 2.28 – Півмуфта відцентрового насоса з тавровими з'єднаннями з композиційного металу



Рисунок 2.29 – Кульовий кран та його основні плаковані деталі з прохідним перерізом діаметром 100 мм



Рисунок 2.30 – Ущільнювальні кільця кульового крана з відшарованим покриттям, нанесеним плазмовим напиленням

На рисунку 2.30 показані ущільнювальні кільця кульового крана з покриттям, що відшарувалося в процесі механічного оброблення, нанесеним плазмовим напилюванням.

Схема формування композиційного наплавлення ущільнювальних кілець така (рис. 2.31). При нагріванні в шар наповнювача, розміщеного на поверхні підкладки, спрямовують розплавлений метал матриці. Розплав переміщається по змочуваних поверхнях, наплавлених деталях, і порошку, витісняючи з нього газу.

За наявності форми на ній передбачають дренажний прошарок, що не змочується розплавом, для відведення газу. Переміщення розплаву по плоскій поверхні підкладки випереджає її переміщення в лабіринті зазорів між частинами порошку. Дискретні потоки розплаву від поверхні підкладки в шар порошку витісняють газу на поверхню шару.

Для плакування збирають форму 1 і деталь, що наплавляється, 2 із зазором 3. У зазор 3 поміщають зносостійкий порошковий матеріал. Зазор 3 з'єднують із камерою-живильником 4, в яку поміщають метал матриці 5. Попередньо перед складанням на поверхні металевій формі 1 розміщують прошарок 6 із газопроникного матеріалу, що не змочується розплавом матриці. При застосуванні керамічної форми такий прошарок не потрібний. Гази витісняються розплавом по поверхні форми, що не змочується. Зібраний вузол нагрівають у вакуумі або захисному газі, витримують та охолоджують. Оскільки прошарок не змочується і не з'єднується з металом матриці, форма після охолодження легко відділяється з наплавленого шару без застосування механічного оброблення і може використовуватися багаторазово.

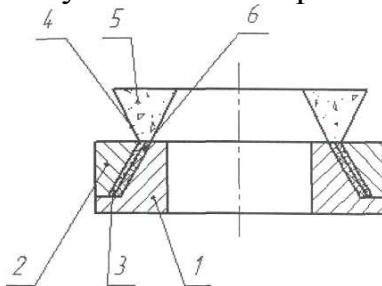


Рисунок 2.31 – Схема плакування ущільнювального кільця композиційним металом: 1 – керамічна або металева форма; 2 – сталеве кільце, що наплавляється; 3 – порошок наповнювача в зазорі; 4 – живильник із металом матриці; 5 – метал матриці; 6 – не змочуваний розплавом захисний шар на формі

У промисловій технології для наплавлення кілець кульових кранів методом просочення застосовують металеві порошки стелітів ПР-КХ30Н6ВСП (АН 34), ПР-КХ30Н2ВР (АН 35) грануляції 40–400 мкм як наповнювачі і порошок матриці ПР-Х17Н70С12Р (П14) грануляції 40–630 мкм. Така композиція матеріалів забезпечує плакованому кільцю твердість шару 500–600 НV, високу зносостійкість і корозійну стійкість в агресивних середовищах, зокрема що утримує сірчану кислоту.

Технологічна схема здійснення способу плакування ущільнювальних кілець просоченням розплавом наповнювача подана на рис. 2.32. Для формування плакувального шару може бути застосована керамічна форма (рис. 2.33) або стальова з нанесенням захисної пасти, що запобігає взаємодії розплаву зі сталлю. Форми придатні для багаторазового використання.

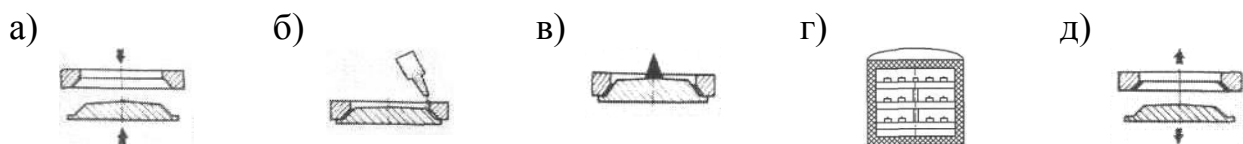


Рисунок 2.32 – Схема формування плакувального шару: а) установлення деталі на технологічну форму; б) заповнення зазору наповнювачем; в) дозування та установлення металу матриці; г) нагрівання у вакуумній печі; д) видалення форми



Рисунок 2.33 – Керамічні форми для плакування ущільнювальних кілець 100, 80, 50, 40, 25 мм

На рисунку 2.34 показані ущільнювальні кільця кульових кранів, виготовлені із застосуванням просочення наповнювача зі сплавом АН-35. Експлуатація кульових кранів із такими кільцями в умовах агресивних середовищ упродовж багатьох років підтвердила надійність і якість плакування.

2.1.4. Металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів на деталі та вузли компресорів

Металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів, що вміщує хром, залізо і нікель, додатково містить кремній, бор при такому співвідношенні компонентів, мас., %: хром – 8–14; кремній – 2,5–3,2; бор – 1,5–2,5; залізо – 4–6; нікель – інше, при цьому фракційний склад порошку перебуває в межах (30–55) мкм.

а)



б)



Рисунок 2.34 – Ущільнювальні кільця \varnothing 25–200 мм кульових кранів у стані після плакування (а) та механічного оброблення (б)

Такий металевий порошок має високу здатність до осадження та одержання покриття поліпшеної якості, при цьому порошок не сегрегує. Покриття, виконане з порошку такого складу, є хорошою основою для нанесення додаткових зовнішніх покриттів.

При виготовленні зразка виробу з покриттям брали зразок основи з нержавіючої сталі 12×18Т з розмірами 2×20×20 мм. Заготовку виробу відпалювали для зняття дефектності та наносили покриття з порошку (фракційний склад якого перебував у межах (30–55) мкм) такого складу (табл. 2.19).

Таблиця 2.19 – Склад металевого порошку

Склад	Приклад				
	1	2	3	4	5
Хром, %	10,0	8,0	11,0	14,0	10,0
Кремній, %	3,0	3,2	3,1	2,5	3,0
Бор, %	2,0	1,5	2,0	2,5	2,0
Залізо, %	5,0	6,0	5,5	4,0	5,0
Нікель, %	80	81,3	78,4	77	80
Товщина покриття, мкм	70–120	70–110	70–120	75–120	70–120
Показники					
– коефіцієнт відшаровування	0,4	0,6	0,5	0,7	0,4
– твердість, ГПа	41,2 ± 1,1	34,9 ± 1,1	32,8 ± 1,1	39 ± 1,1	41,2 ± 1,1
– модуль пружності, ГПа	520 ± 27	440 ± 27	400 ± 27	480 ± 27	520 ± 27

За допомогою плазмотрона «Імпульс-6» були нанесені покриття з такими параметрами: фракція порошку ~ (30–55) мкм; витрати ~ 22,5 г/хв; частота імпульсів – 4 Гц; ємність конденсаторних батарей – 800 мкФ; відстань до зразків – 60 мм, швидкість переміщення зразків – 380 мм/хв. Як електрод був використаний W. Перед напилюванням поверхню зразків обробляли струменево-абразивно з подальшим оплавленням плазмовим струменем. Повторне оплавлення поверхневого шару покриттів проводили плазмовим струменем без порошку. Частота імпульсів – 3 Гц, ємність – 800 мкФ, відстань від зрізу сопла до заготовки – 45 мм, швидкість переміщення – 300 мм/хв. Оброблені заготовки були оплавлені плазмовим струменем так, щоб оплавився шар товщиною 60–80 мкм. Міцність зчеплення одержаного покриття з основою (коефіцієнт відшаровування) оцінювали методом алмазного індентування на твердомірі ТК-2М. У результаті на зразку з покриттям одержували лунку від індентора з відшаровуванням покриття навколо неї. За коефіцієнтом відшаровування, обумовленим співвідношенням площі відшаровування і лунки, робили висновок про міцність зчеплення покриття та основи. Як показують дослідження, отримані зразки виробу мають низьку швидкість корозії. Виріб характеризується високою міцністю зчеплення його з основою і високою стійкістю до утворення тріщин.

2.1.5. Виріб із двошаровим покриттям

Виріб із двошаровим покриттям містить сталеву основу та шар покриття, нанесений безпосередньо на основу, і шар покриття, нанесений на попередній шар. Шар покриття, нанесений безпосередньо на основу, має товщину в межах 70–120 мкм і виконаний із суміші хрому, кремнію, бору, заліза, нікелю з таким співвідношенні компонентів, мас., %: хром – 8–14; кремній – 2,5–3,2; бор – 1,5–2,5; залізо – 4–6; нікель – інше, а шар покриття, нанесений на попередній шар, виконаний із суміші нітриду титану і нітриду хрому в такому співвідношенні компонентів, мас., %: нітрид хрому – 20–30; нітрид титану – інше або із суміші нітриду титану і нітриду алюмінію в співвідношенні компонентів, мас., %: нітрид алюмінію – 20–30; нітрид титану – інше.

На рисунку 2.35 показаний зовнішній шар покриття 1, попередній шар покриття 2, нанесений безпосередньо на основу 3. При застосуванні виробу важливі наявність зовнішнього шару покриття 1, попереднього шару покриття 2 на основі 3, особливості їх складу та розміру (рис. 2.36).

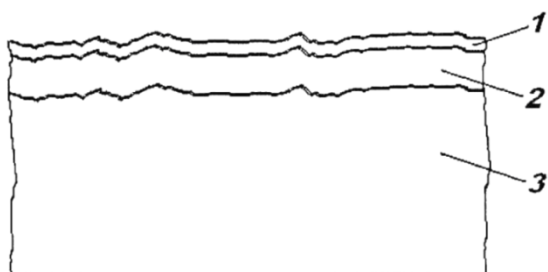


Рисунок 2.35 – Виріб із двошаровим покриттям

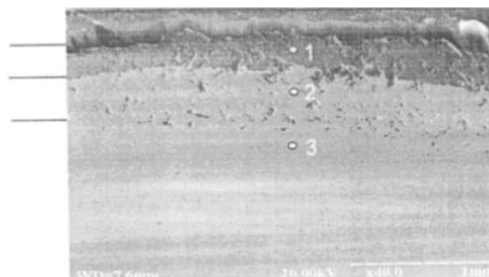


Рисунок 2.36 – Зображення косого шліфа, одержаного в зоні стику захисних покриттів з основою виробу

Як приклад виготовлення зразка виробу із двошаровим покриттям, брали зразок основи з нержавіючої сталі 12Х18Т із розмірами 2х20х20 мм. Заготовку виробу відпалювали для зняття дефектності. На заготовку виробу наносили покриття з порошку розміром (30–6) мкм такого складу (табл. 2.20).

За допомогою плазмотрона «Імпульс-6» були нанесені покриття з такими параметрами: фракція порошку ~ (30–55) мкм, витрати ~ 22,5 г/хв, частота імпульсів – 4 Гц, ємність конденсаторних батарей – 800 мкФ, відстань до зразків – 60 мм, швидкість переміщення зразків – 380 мм/хв. Як електрод був використаний W. Перед напилюванням поверхню зразків обробляли струменево-абразивно з подальшим оплавленням плазмовим струменем. Повторне оплавлення поверхневого шару покриттів проводили плазмовим струменем без порошку. Частота імпульсів – 3 Гц, ємність – 800 мкФ, відстань від зрізу сопла до заготовки – 45 мм, швидкість переміщення – 300 мм/хв. Оброблені заготовки були оплавлені плазмовим струменем так, щоб оплавився шар заготовки 60–80 мкм. На всі заготовки були нанесені зовнішні покриття зі складом, зазначеним у табл. 2.20, за допомогою вакуумно-дугового джерела. Поверхню товстого покриття відпалювали шляхом дії дугового розряду впродовж 1 хв (10–3 Па) при струмі горіння дуги титанового катода 100 А та опорній напрузі 1 кВт. Осадження покриттів проводили в камері установки за тиску азоту 10–1 Па. Час осадження зовнішнього покриття становив 10 хв. Твердість і модуль пружності зразків виробів визначали за допомогою нанотвердоміра (Nanoindenter II) за методикою Олівера і Фара з використанням індентора Берковича.

Таблиця 2.20 – Склад порошку

	Ознака виробу	Приклад				
		1	2	3	4	5
Попередній шар покриття	хром, %	8,0	14,0	10,0	11,0	11,0
	кремній, %	3,2	2,5	3,0	3,1	3,1
	бор, %	1,5	2,5	2,0	2,0	2,0
	залізо, %	6,0	4,0	5,0	5,5	5,5
	нікель, %	81,3	77	80	78,4	78,4
	товщина покриття, мкм	70–110	75–120	70–120	80–110	70–120
Зовнішній шар покриття	нітрид алюмінію, %	20			30	25
	нітрид хрому, %		20	30		
	нітрид титану, %	80	80	70	70	75
	товщина покриття, мкм	2,1–4,0	2,1–4,0	2,1–4,0	2,1–4,0	2,1–4,0
Показники виробу	– швидкість корозії, мг/рік	9	81	67	12	11
	– твердість, ГПа	34,9 ± 1,1	39 ± 1,1	41,2 ± 1,1	37,0 ± 1,1	32,8 ± 1,1
	– модуль пружності, ГПа	440 ± 27	480 ± 27	520 ± 27	360 ± 27	400 ± 27



Рисунок 2.37 – Зовнішній вигляд установки для нанесення захисних покриттів на деталі компресорних машин

них установок лінійно збільшуються в 1,5–2 рази при нанесенні двошарових покриттів із композиційних матеріалів, досягаючи значень відповідно 430 і 1 160 МПа (див. табл. 2.18).

Як показує дослідження, зовнішнє покриття виробу повністю повторює рельєф основи (див. рис. 2.36). Одержані зразки мають низьку швидкість корозії, що залежить від показників зовнішнього покриття виробу. Виріб характеризується високою міцністю зчеплення його з основою та шарів покриття між собою і високою стійкістю до утворення тріщин.

Розроблено установку для нанесення захисних покриттів на деталі (рис. 2.37), що дозволяють збільшити експлуатаційні можливості компресорних машин.

Показано, що межа втоми і межа міцності вузлів шахтних компресорних

2.2. Фундаментальні розробки у сфері створення методів розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок

2.2.1. Вибір конструкції і технології виготовлення пластинчасто-ребристих теплообмінників

2.2.1.1. Конструкція пластинчасто-ребристого теплообмінника і теплообмінної поверхні

Найбільші коефіцієнти теплопередачі, використання маси, об'єму і компактності серед рекуперативних теплообмінників компресорних установок (КУ) мають пластинчасто-ребристі теплообмінники (ПРТ). ПРТ є паяною шаруватою конструкцією з тонкого листового металу, в якій чергуються канали для охолоджуваного та охолодженого середовищ. У довгих вузьких каналах переміщається охолоджуване середовище, а в перпендикулярно розміщених широких каналах – охолоджене повітря, що нагнітається вентилятором (рис. 2.38).

Конструкція ПРТ відрізняється насамперед улаштуванням робочих каналів. Основні різновиди робочих каналів такі:

1. Робочі канали формують плоскими, так званими проставними листами і брусками, розміщеними на периферії листів (рис. 2.38). Між брусками і листами міститься гофрована стрічка (насадка), що утворює теплообмінну поверхню. З'єднаний за допомогою паяння набір перелічених деталей утворить осердя теплообмінника – пластинчасто-ребристий елемент (ПРЕ) (рис. 2.39).

2. Робочі канали формують зі штампованих листів, що утворюють у з'єднанні між собою або з плоским листом робочий канал без брусків (рис. 2.40). У цьому разі бруски встановлюють лише для утворення каналів для охолодженого повітря (каналів охолодження).

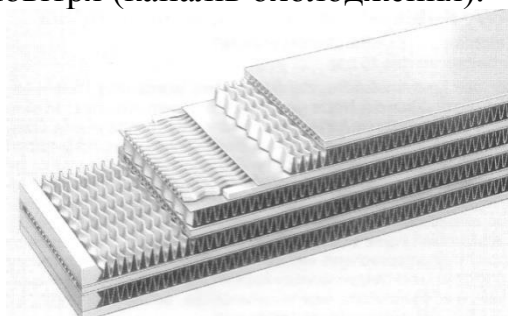


Рисунок 2.38 – Схема ПРТ

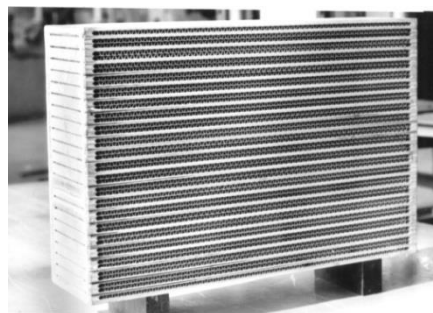


Рисунок 2.39 – Алюмінієвий паяний ПРЕ із брусками на периферії каналів

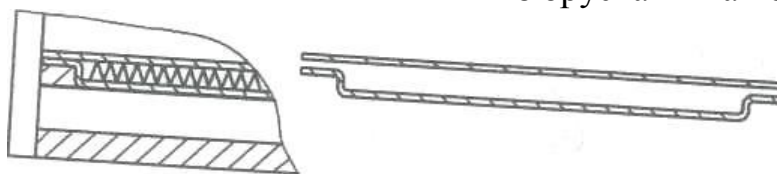


Рисунок 2.40 – Схема робочого каналу ПРЕ зі штампованого проставного листа

3. Робочі канали формують зі штампованих листів, у яких передбачені отвори для утворення вбудованих колекторів. Торці каналів і окружність навколо отворів герметизують за допомогою штампованих деталей – скоб, кілець. Колектор утворюється при паянні ПРЕ (рис. 2.41).

4. Робочі канали формують зі штампованих листів з отворами, відбортовуванням по периметру і кільцевими виступами навколо отворів, що при складанні та паянні утворюють убудовані колектори і забезпечують герметичність усіх з'єднань (рис. 2.42).

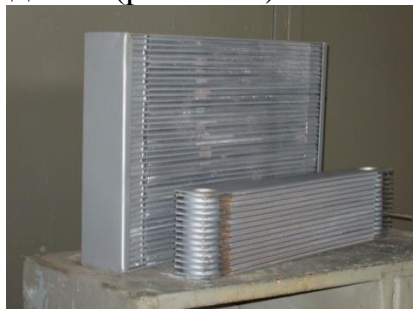


Рисунок 2.41 – Сталеві ПРТ зі штампованих проставних листів із убудованими колекторами

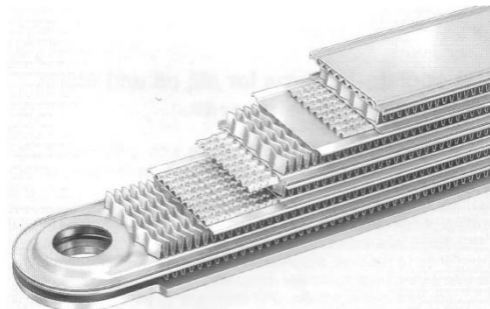


Рисунок 2.42 – Схема ПРТ зі штампованими проставними листами для формування вбудованого колектора

5. Робочі канали формують згортаючи металеву стрічку для утворення плоскої трубки, в якій розміщується насадка гарячого каналу. Поздовжній шов плоскої трубки утворюється напускним паяним з'єднанням. Кінці плоских трубок розміщуються в пазах штампованої колекторної пластини. Схему ПРЕ з такими каналами подано на рис. 2.43, а зовнішній вигляд – на рис. 2.44. Висота каналів H у таких ПРТ перебуває у межах 2–4 мм, ширина D – до 80 мм, довжина каналів – 500–600 мм, висота ПРТ W – 300–400 мм.

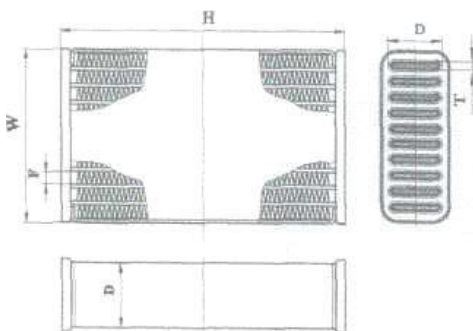


Рисунок 2.43 – Схема ПРЕ із плоскими трубками, сформованими з тонкої стрічки

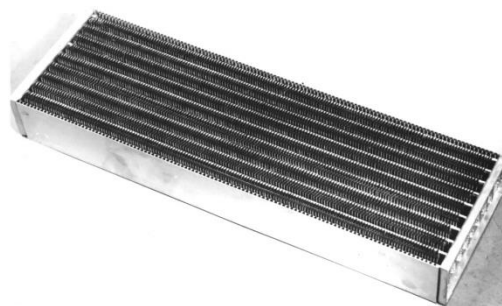


Рисунок 2.44 – Зовнішній вигляд ПРЕ із плоскими трубками як робочими каналами, сформованими з тонкої стрічки

6. Робочі канали формують із плоских алюмінієвих трубок. Усередині трубки для забезпечення міцності є поздовжні ребра. Такі трубки виготовляють екструзією. Кінці трубок розміщаються в пазах штампованих колекторних пластин (рис. 2.45).

Вибір конструкції робочого каналу для охолоджуваного середовища за-

лежить від призначення ПРТ, робочого тиску, теплової потужності та технологічних можливостей виробництва. Для формування робочих каналів застосовують металеві стрічки і листи товщиною 0,25–1 мм, а теплообмінну гофровану насадку виготовляють зі стрічки товщиною 0,15–0,3 мм. Розміри ПРЕ перебувають у межах (50–150)х(200–600)х(400–1200) мм та залежать від теплової потужності ПРТ і розмірів робочої камери, печі, що застосовується для паяння.

У тих випадках, коли під час паяння формується лише осердя теплообмінника – ПРЕ, до нього за допомогою зварювання з боку каналів для охолоджувального середовища приєднують колектори (кришки) (рис. 2.46). За необхідності ПРЕ за допомогою зварювання можна з'єднати блоками для збільшення розмірів ПРТ.

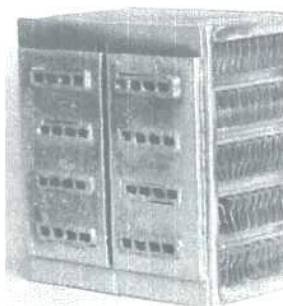


Рисунок 2.45 – Модель алюмінієвого паяного ребристого теплообмінника із плоскими ребристими трубами

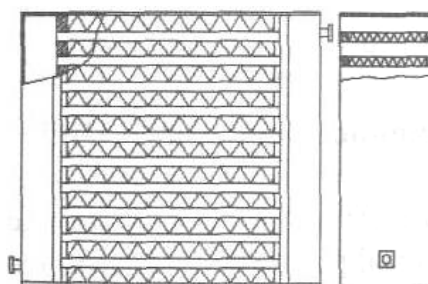


Рисунок 2.46 – Схема ПРТ із привареними колекторами

Основним вузлом ПРТ є осердя ПРЕ. Багатошаровий пакет, складений із тонкостінних деталей, з'єднується у вузол ПРЕ за допомогою високотемпературного паяння. При цьому паяння є єдино можливим способом виготовлення ПРЕ, оскільки майже всі з'єднання ПРЕ є закритими. Керування і візуальний контроль за утворенням з'єднань є недоступними. Це вимагає високої точності виконання усіх технологічних операцій під час складання та додержання режимів процесу паяння. Значущість процесу паяння у створенні ПРЕ можна оцінити таким прикладом. ПРЕ розміром 150×400×850 мм, що складається з робочих каналів висотою 3 мм і каналів охолодження, що прилягають до нього, висотою 11 мм (див. рис. 2.39), з'єднується 12 500 паяними швами. Довжина паяних швів становить 2 258 м, площа паяних швів – 33 075 см². Якщо врахувати, що паяння є груповим способом оброблення і в камері печі під час паяння одночасно перебувають десятки ПРЕ, то за продуктивністю з цим процесом не може зрівнятися жоден із способів зварювання. Важливою є ще одна перевага паяння. У ПРЕ переважають таврові з'єднання. Відомо, що жолобник у таврі не є концентратором напруги при співвідношенні $R > 2s$, де R – радіус жолобника; s – товщина стінки тавра. Оскільки таврові з'єднання в ПРЕ утворені стрічкою товщиною 0,15–0,3 мм, а радіус жолобника, сформований розплавленим припоєм під дією капілярних сил, дорівнює 0,3–0,5 мм, то ПРЕ являє собою надійну конструкцію, що не руйнується під час вібрації.

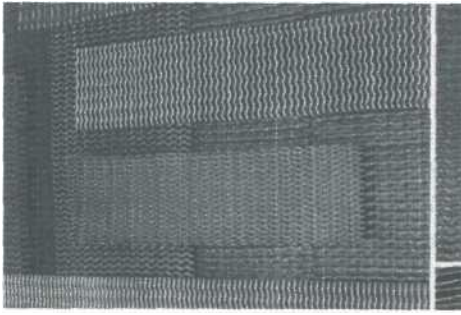


Рисунок 2.47 – Зовнішній вигляд насадки з гофрованої стрічки

Теплову ефективність ПРТ забезпечує розвинена теплообмінна поверхня з гофрованої металеві стрічки (насадка), припаяна до листів каналів нагрівання та охолодження (рис. 2.47).

Як характеристику насадки, крім форми та геометричних розмірів, застосовують еквівалентний діаметр і компактність поверхні. Еквівалентний діаметр застосовують під час розрахунку теплообміну в ПРТ. При визначенні чисел подібності необхідно вводити визначальний лінійний розмір. Для пластинчасто-ребристих поверхонь визначальним розміром є еквівалентний діаметр. Його визначають за такою формулою:

$$De = \frac{4F_c L}{F},$$

де De – еквівалентний діаметр, м; F_c – площа вільного перерізу одного каналу, m^2 ; F – площа повної поверхні теплообміну одного каналу, m^2 ; L – робоча довжина поверхні теплообміну в каналі, м.


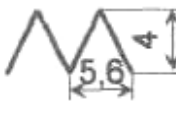
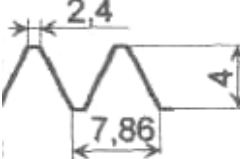
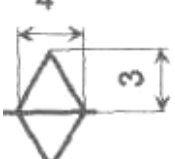
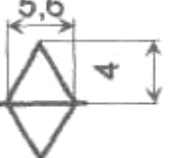
Практично висота каналів ПРТ перебуває в межах 3–12 мм, а еквівалентний діаметр – відповідно 2–5 мм. Оптимальний переріз каналів вибирають з умови забезпечення максимального тепловідведення при фіксованих втратах на опір. Для довгих каналів ($L/D > 100$) значення числа Нуссельта Nu близьке до мінімального. Для ПРТ компресорних установок, що охолоджують гази й масло, опір невеликий. У цих випадках число Nu практично не залежить від швидкості. Тому визначальним фактором при виборі оптимального перерізу каналу є інтенсивність теплообміну незалежно від відповідного коефіцієнта опору, тому що перепад тиску завжди можна збалансувати за рахунок зменшення швидкості потоку, якщо немає особливих вимог.

Під час порівняння каналів трикутного, круглого і прямокутного профілів встановлено, що канал прямокутного перерізу має істотні переваги: $Nu_{\Delta} = 2,7$; $Nu_{\circ} = 3,66$; $Nu_{\square} = 7,5$. За іншу характеристику взята компактність поверхні насадки в m^2/m^3 . Вона визначає площу поверхні цієї насадки, m^2 , в одному кубічному метрі об'єму каналу, в якому розміщена. При цьому враховують і площу проставного листа каналу, що обмежує по обидва боки по висоті насадку. Якщо насадка встановлюється кількома шарами, її обмежує лист прокладки між шарами. У такому разі враховують площу прокладки. Площа теплообмінної поверхні при збільшенні кількості шарів у каналі збільшується, а компактність не змінюється, тому що вона залежить лише від геометричних розмірів профілю насадки.

Гофрування стрічки виконують двома способами – прокатуванням між профільними роликками і штампуванням. У таблиці 2.21 наведені характеристи-

ки насадки, гофрування якої виконують під час переміщення стрічки через пару профільних роликів.

Таблиця 2.21 – Характеристика насадки, сформованої прокатуванням роликками

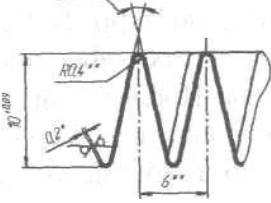
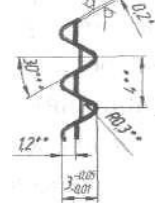

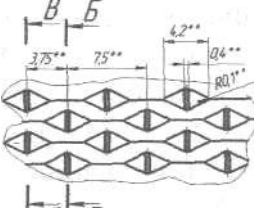
Тип насадки	Трикутна	Трикутна	Евольвентна	Двошарова трикутна	Двошарова трикутна
Геометрична характеристика, мм					
Компактність поверхні, м ² /м ³	1 813	1 342	1 021	1 813	1 342
Еквівалентний діаметр, м	0,00192	0,0027	0,00362	0,00192	0,0027

Підвищення компактності насадки збільшує ефективність теплообміну. Компактність підвищується при зменшенні відстані між гофрами. Однак при формуванні насадки з металевої стрічки прокатуванням роликками крок накатки обмежується припустимими розмірами профілю їх зубів. Розмір зубів біля основи роликів встановлюється з урахуванням втомної міцності металу роликів. Тому, як правило, крок гофр насадки більший від висоти гофр (див. табл. 2.21). Крім того, форма профілю насадки, сформованої прокатуванням, може бути лише трикутною або евольвентною.

Для каналів охолодженого середовища (каналів охолодження) необхідна насадка з висотою гофр більше ніж 10 мм. У цьому разі застосовують декілька пар роликів для ущільнення гофр насадки. На спеціальних станах перша пара роликів, зібрана із профільованих зубчастих дисків, забезпечує геометрію гофр. Гофрам можна додати хвилястості, на поверхнях гофр можна сформувати сфероїдальні виступи. Наступні дві або три пари роликів за рахунок різниці кроків зубів здійснюють ступеневе зрушення гофр до необхідного розміру кроку. За наявності опуклих ділянок у каналах хвилястої насадки утворюються аеродинамічні профілі, що керують потоком повітря. Більш просту аеродинамічну форму каналів одержують при перетисканнях гребенів гофр. Таку форму насадки одержують під час прокатування однією парою профільованих роликів (табл. 2.22).



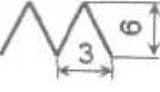

Ущільнення за кроком насадки з невеликою висотою гофр за допомогою роликів утруднене. Ущільнену насадку формують штампуванням. На спеціальному пресі за допомогою штампів крок за кроком формують трикутну, прямокутну і трапецієподібну за формою насадку (табл. 2.23). У штапованій насадці формують крок із розміром, меншим ніж висота гофр. Цим досягають найбільшої компактності. При штампуванні можливе формування насадки з прямокутним профілем, що також дозволяє підвищити інтенсивність теплообміну.

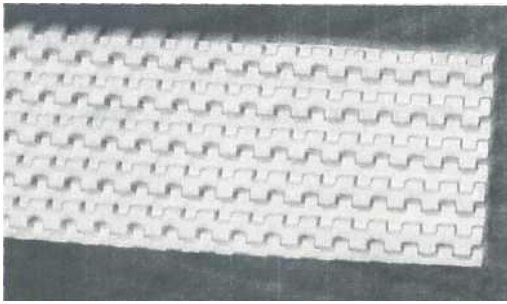
Таблиця 2.22 – Характеристика насадки, сформованої прокатуванням роликками з ущільненням і деформацією гофр

Тип насадки	Трикутна хвиляста	Трикутна з перетисканнями
Геометрична характеристика, мм		
Форма гофр		
Компактність поверхні, м ² /м ³	883	1 813
Еквівалентний діаметр, м	0,0042	0,00192

Під час переміщення теплоносіїв у каналах насадки, виготовленої з металевої стрічки прокатуванням роликками або штампуванням, формуються стійкі ламінарні потоки. Теплообмін ділянок, що прилягають до поверхні насадки, з ядром потоку відбувається за рахунок теплопровідності теплоносія. У робочих (гарячих) каналах ПРТ, в яких переміщується теплоносій із низькою теплопровідністю, насадка з гладкою поверхнею знижує ефективність теплообміну. Розсічення ламінарного контактного шару дозволяє активно інтенсифікувати теплообмін. Кінознімання потоку, що руйнується вертикальними стінками – шипами, зафіксувала утворення завихрень. Між завихреннями та ядром потоку відбувається неупорядкований турбулентний обмін рідкими масами. У штампованій насадці зі стрічки можна створити турбулентний потік, розсікаючи стрічку гофр. У розсіченій стрічці можна сформувати жалюзі або зрушити стінку гофри для розриву контактної оболонки й утворення завихрення (табл. 2.24). Турбулізація потоку поєднанням із малою теплопровідністю рідини дозволяє інтенсифікувати теплообмін у 2–2,5 раза порівняно з ламінарним потоком. Розсічення зі зрушенням стінок гофр істотно інтенсифікує теплообмін і в газовому потоці. Заміна гладкої насадки, розсіченої зі зрушенням у повітряному каналі ПРТ, дозволяє зменшити співвідношення L/D із 20 до 1,68.

Таблиця 2.23 – Характеристика штампованої насадки

Тип насадки	Трикутна	Трикутна	Трикутна	Прямокутна	Прямокутна
Геометрична характеристика, мм					
Компактність поверхні, м ² /м ³	2 178	1 963	1 675	1 450	1 300
Еквівалентний діаметр, м	0,00155	0,00174	0,00207	0,00244	0,00275



Зовнішній вигляд розсіченої насадки зі зрушеними стінками гофри показаний на рис. 2.48. Для формування розсіченої, розсіченої з утворенням жалюзі, розсіченої зі зрушенням частини гофр потрібні спеціальні високоточні штампи, спеціалізовані преси і стани. Необхідно зазначити, що продуктивність штампування насадки невисока.

Рисунок 2.48 – Насадка з розсіченими зрушеними гофрами

Таблиця 2.24 – Характеристика штампованої розсіченої насадки

Тип насадки	Трапецієподібна	Трапецієподібна
Геометрична характеристика, мм		
Форма гофр		
Компактність поверхні, м ² /м ³	1 306	781
Еквівалентний діаметр, м	0,00278	0,00482

Формування одного кроку гофр триває 0,5–1 с. Крім того, насадка зі складним профілем формується в основному з алюмінієвих і мідних стрічок, що мають низьку міцність. Штампування такої насадки зі сталеві стрічки ускладнене.

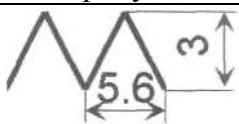
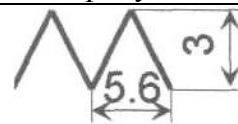
2.2.1.2. Визначення впливу особливостей теплообмінної поверхні з металеві сітки на ефективність пластинчасто-ребристих теплообмінників

Деякі проблеми виготовлення ефективної насадки з розсіченою поверхнею гофр вирішуються за допомогою прокатування між профільними роликami смуги з металеві дротові ткані сітки. Насадку формують із сітки, виготовленої з тонкого дроту (~0,3–0,4 мм), що дозволяє одержати примежовий шар невеликої товщини. Крім того, у сіткових насадках при числах Рейнольдса $Re > 5$ (що практично завжди має місце в маслоохолоджувачах) спостерігаються відрив ламінарного примежового шару й утворення вихорів за кормовою частиною дроту.

Металева тканя сітка є новим матеріалом для формування теплообмінної поверхні в ПРТ. Автори в ряді праць досліджували опір сітки потоку середовища, коефіцієнт теплопередачі, міцність паяного робочого каналу із сітковим ребренням, технологічну міцність насадки із сітки при складанні та обпресу-

ванні ПРЕ, а також у процесі паяння. Досліджували насадку, виготовлену прокатуванням сітки роликками з трикутним профілем зуба. Прокатування виконували у напрямку дроту сітки (табл. 2.25). Конструкція плетеної сітки не дозволяє точно передати профіль зуба накатних роликів, тому реально профіль насадки із сітки має не прямі лінії сторін, а радіусні криві, що плавно переходять одна в одну. При цьому радіус на вершинах гофр становить не менше ніж 5 мм.

Таблиця 2.25 – Характеристика насадки зі сталевій плетеної сітки

Тип насадки	Трикутна	Трикутна
Геометричні характеристики, мм		
Розмір комірки сітки, мм	1,2	1,2
Ø дроту, мм	0,32	0,4
Компактність поверхні, м/м	1 277	1 381
Еквівалентний діаметр, м	0,00273	0,00241

Для визначення максимального тиску середовища в робочому каналі проводили випробування зразків у вигляді макета, що моделює робочий канал маслоохолоджувача з фіксуванням тиску початку деформації макета і повного його руйнування. Випробування проводили на вантажопоршневому пресі МП-600 із контролем на манометрі МПІ.

Макет (рис. 2.49) складається з основи зі штуцером, обмежувального кільця і диска зі сталевій стрічки. У середині кільця розміщували насадку із сітки. Між шарами основа – кільце із сіткою – сталевим диском розміщували припій у вигляді мідної фольги товщиною 0,03 мм. Для фіксування деталей, що паяються, під час паяння зверху на диск клали вантаж. Зразок паяли у вакуумній печі за таким температурним режимом: нагрівання – до 1 120 °С, витримка – 10 хв, охолодження в печі.

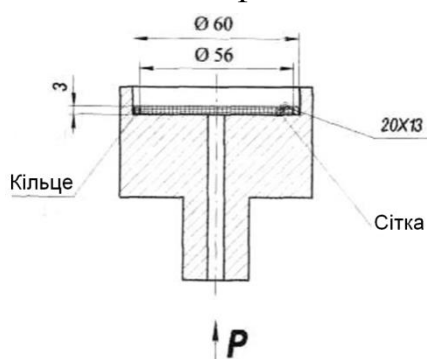


Рисунок 2.49 – Схема зразка для випробувань міцності каналу з насадкою із сітки

Випробовували насадку із сітки зі сталі 12Х18Н9 із квадратними комірками з розміром сторони 1,2 мм і діаметром дроту 0,32 мм. Сталевий диск виготовляли зі стрічки 20Х13 товщиною 0,15 мм. Стрічку вибрали такої товщини, для того щоб міцність диска мінімально впливала на визначення міцності насадки із сітки.

Гідравлічні випробування проводили плавним підвищенням тиску масла у внутрішній порожнині макета з фіксуванням за манометром початку деформації листа та повного руйнування макета. Результати випробувань наведені в табл. 2.26. Початок пластичної деформації листа визначали за різким зниженням тиску без руйнування зразка. Після цього продовжували збільшувати навантаження до повного руйнування. Після руйнування від зразка відокремлювали диск із припаяною сіткою для досліджень на оптичному мікроскопі МБС-9.

Таблиця 2.26 – Результати випробування робочого каналу з насадкою із сітки

Товщина диска, мм	Тиск на початку деформації каналу, МПа	Тиск під час руйнування каналу, МПа
0,15	7,6	7,6
0,15	6,2	6,4
0,15	5,8	7,2
0,15	6,0	5,8
0,15	6,0	6,0
0,45	8,6	11,2
0,45	8,2	8,6

Процес навантаження і руйнування випробовуваних макетів відбувається в кілька послідовних етапів: 1) вигинання диска між гребенями сітки-насадки; 2) випрямлення ниток сітки із частковим руйнуванням паяних з'єднань у місцях переплетення дротів; 3) розрив дротів сітки; 4) деформація диска; 5) руйнування диска. Для порівняння провели паяння контрольних макетів без насадки (табл. 2.27).

Таблиця 2.27 – Результати випробування паяного каналу без насадки

Товщина диска, мм	Деформація каналу, МПа	Руйнування каналу, МПа
0,15	2,8	3,2
0,15	2,4	2,8

Аналіз результатів експериментів засвідчує, що наявність припаяної насадки із сітки істотно підвищує міцність каналу. Збільшення товщини проставного листа в каналі із сітковою насадкою також підвищує міцність каналу (див. табл. 2.26). Для визначення міцності паяного з'єднання насадки із сітки проводили випробування моделей, що імітують паяне з'єднання. Модель (рис. 2.50) складається із верхньої 1 та нижньої 2 основ діаметром 48 мм, підкладок 3 і насадки 4. Підкладки припаювали до основи і насадки мідним припоєм 5 у вигляді фольги товщиною 0,03 мм. Паяння виконували у вакуумній печі за температури $T_{II} = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$ і розрідження $1 \cdot 10^1$ Па. Для визначення впливу параметрів режиму паяння зразки паяли з витримкою за температури паяння 15, 30 і 45 хв. Після паяння проводили випробування на розтягування на випробувальній машині ZD-10/90. Результати випробувань наведені в табл. 2.28. Аналіз зруйнованих зразків засвідчив, що в місці зіткнення насадки з листом формується якісне паяне з'єднання з гарним жолобником (рис. 2.51).

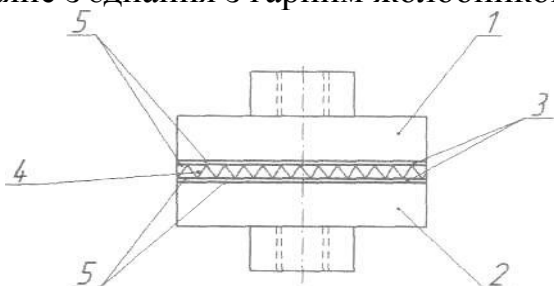


Рисунок 2.50 – Схема зразка, що імітує паяне з'єднання насадки із сітки в каналі

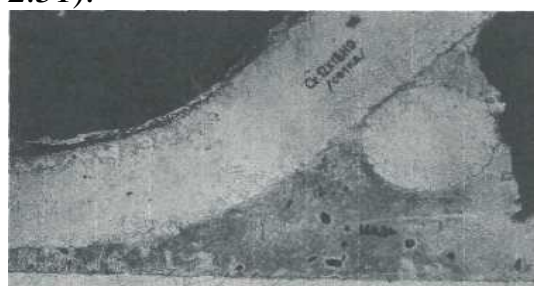


Рисунок 2.51 – Структура паяного з'єднання сітки з листом

Таблиця 2.28 – Міцність паяного з'єднання насадки із сітки

Час витримки, хв	15	30	45
Межа міцності, МПа	6,32	6,10	6,22

Для застосування насадки із сітки необхідні відомості про міцність і припустиме навантаження на насадку під час виконання паяння. Насадка в каналі зазнає навантаження від ваги вищерозміщених каналів та технологічного оснащення. При змочуванні сталі розплавленим припоєм, особливо розплавом міді, відбувається абсорбційне зниження міцності металу сітки. Зміну стану насадки із сітки перевіряли на зразках, схема яких показана на рис. 2.52.

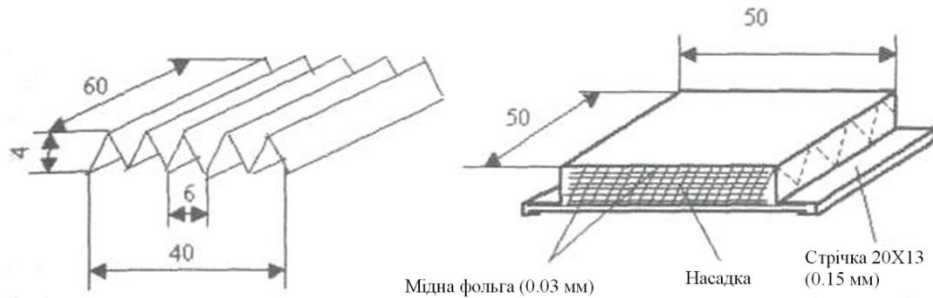


Рисунок 2.52 – Схема зразка для випробування міцності насадки при паянні

Для визначення теплотехнічних і гідравлічних характеристик насадки із сітки випробовували водяні охолоджувачі масла із сітковим орєбренням із різною геометрією та розміщенням гофр у каналах для охолодження масла. Схема перерізу каналів із різним розміщенням гофр сіткової насадки показана на рис. 2.53.

Для визначення коефіцієнта теплопередачі K у водомасляному теплообміннику тепловий потік визначали за витратою масла та різницею температур масла між входом і виходом. Вивчали вплив кроку гофр s та їх розміщення щодо руху потоку масла на теплопередачу і гідравлічний опір масляному потоку за однакової витрати води. Експерименти проводили із чотирма теплообмінниками, в каналах яких насадка розміщена гофрами поперек (МЖТ1 та МЖТ4) та вздовж (МЖТ2 і МЖТ3) потоку масла. У водяних каналах застосовували гофровану насадку з гладкою поверхнею. Результати досліджень та оброблення експериментальних даних наведені на рис. 2.54. Дослідні дані з теплопередачі були апроксимовані такими рівняннями:

а)

б)



Рисунок 2.53 – Схема перерізу масляного каналу із сітковою насадкою при розміщенні гофр уздовж (а) і поперек (б) потоку масла

$$\text{для МЖТ1 } K = 55,2 Re_m^{0,4885}, \text{ Вт/м}^2 \text{ К; } R^2 = 0,9641;$$

$$\text{для МЖТ2 } K = 33 Re_m^{0,4461}, \text{ Вт/м}^2 \text{ К; } R^2 = 0,8951;$$

для МЖТ3 $K = 29,4Rem^{0,5385}$, Вт/м² К; $R^2 = 0,9677$;
 для МЖТ4 $K = 35,441Rem^{0,5623}$, Вт/м² К; $R^2 = 0,9867$.

Дослідні дані про втрати тиску масла залежно від числа Рейнольдса Rem апроксимовані рівняннями:

для МЖТ1 $\delta P_m = 0,0069Rem^{0,9933}$, МПа; $R^2 = 0,8996$;
 для МЖТ2 $\delta P_m = 0,0019Rem^{0,9778}$, МПа; $R^2 = 0,8869$;
 для МЖТ3 $\delta P_m = 0,0009Rem^{1,2618}$, МПа; $R^2 = 0,9687$;
 для МЖТ4 $\delta P_m = 0,0043Rem^{1,1752}$, МПа; $R^2 = 0,9838$.

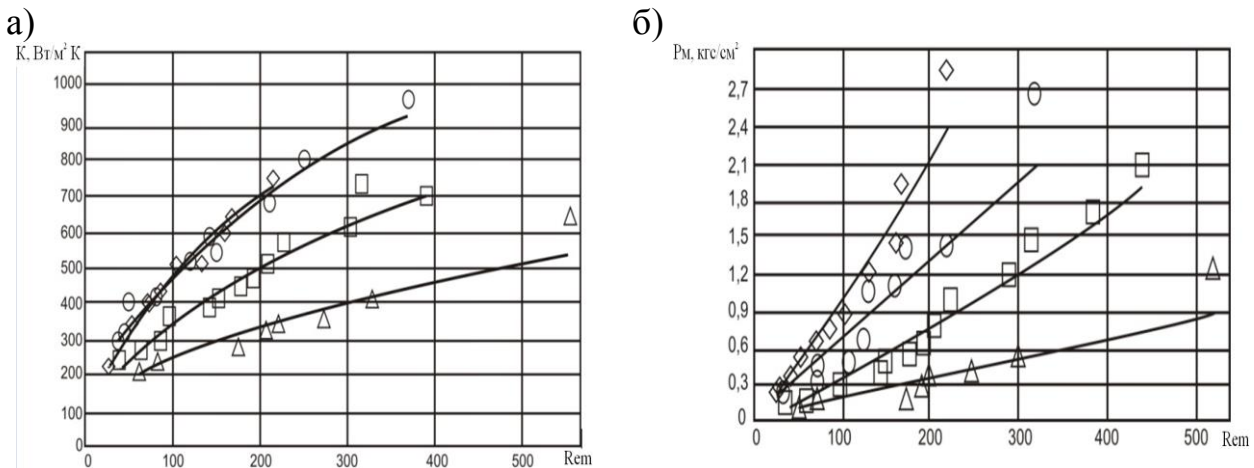


Рисунок 2.54 – Залежність коефіцієнта теплопередачі (а) і втрати тиску масла (б) від числа Рейнольдса (Rem), кроку гофр сітчастої насадки та їх розміщення щодо напрямку руху потоку масла: Δ , \square – гофри уздовж потоку; O , \diamond – поперек потоку; $s = 5,8$ і $4,0$ мм

Аналіз графіків засвідчує, що теплопередача в маслоохолоджувачах із гофрами, розміщеними в каналах поперек потоку масла, вища, а втрата тиску масла більша, ніж у маслоохолоджувачах із гофрами, розміщеними в каналах уздовж потоку масла.

У дослідях із насадкою з гофрами, розміщеними поперек потоку масла, установлено, що зі зменшенням кроку гофр теплопередача не змінилася при помітному збільшенні втрати тиску масла. Пояснення виявленої особливості вимагає додаткових досліджень. У результаті досліджень гідравлічного опору пластинчасто-ребристих теплообмінників із насадкою з гофрованої сітки при течії масла визначений коефіцієнт опору сітки ξ_c . На рисунку 2.55 подані експериментальні та розрахункові значення коефіцієнта опору для сіткової насадки залежно від числа Рейнольдса.

Дослідні дані на ділянці 1 апроксимовані рівнянням
 $\xi_c = 45,028Rem^{-0,6245}$, $Rem = 5-210$, $R^2 = 0,9747$.

Дослідні дані на ділянці 2 апроксимовані рівнянням
 $\xi_c = 34,27Rem^{-0,5877}$, $Rem = 210-930$, $R^2 = 0,9682$.

Результати дослідження впливу діаметра дроту плетеної сітки на коефіцієнт опору потоку масла наведені на рис. 2.56.

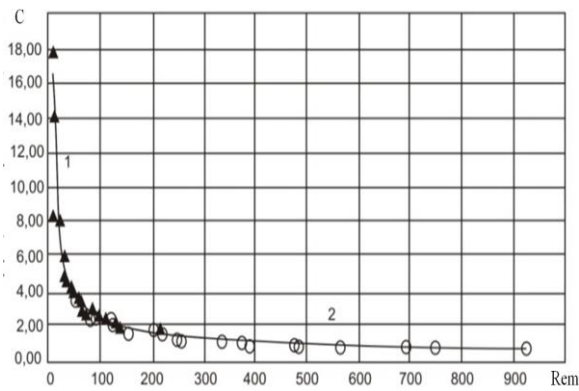


Рисунок 2.55 – Залежність коефіцієнта опору сітки, установленної в каналах ПРТ гофрами поперек потоку масла, від числа Рейнольдса: 1 – діаметр дроту 0,32 мм; 2 – діаметр дроту 0,4 мм

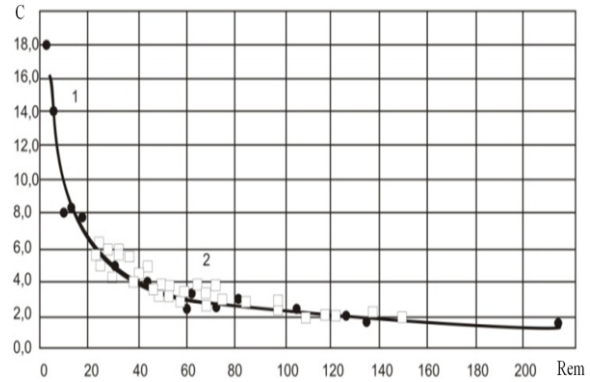


Рисунок 2.56 – Залежність коефіцієнта опору сітки з різним діаметром дроту, установленної в каналах ПРТ гофрами поперек потоку масла, від числа Рейнольдса: 1 – діаметр дроту 0,32 мм; 2 – діаметр дроту 0,4 мм

Одержані результати досліджень дозволяють вважати, що для підвищення ефективності теплопередачі краще застосовувати насадки з гофрами, розміщеними поперек потоку масла. Однак вибір конкретного способу розміщення гофр щодо потоку масла та їх кроку визначається вимогами до теплових і гідравлічних параметрів маслоохолоджувачів.

Регулювання швидкості потоку в каналах ефективно в ПРТ із убудованими колекторами. Пристрій ПРТ із комбінованою насадкою в робочих каналах показаний на рис. 2.57.

Становить інтерес застосування насадки із сітки і в каналах охолодження. Турбулізація потоку охолодженого повітря може істотно підвищити ефективність охолодження в ПРТ. Досліджували ПРТ, у каналах охолодження якого встановлена у двох шарах гофрована сітка з висотою гофр 3 мм. Шари сіткової насадки розділені тонким проставним листом. У результаті досліджень аеродинамічного опору пластинчасто-ребристого теплообмінника з гофрованою насадкою із дротяної сітки при повітря визначений фактор тертя сітки, що залежно від числа Re узагальнений рівнянням

$$f = 0,0145 Re^{0,1614}, R^2 = 0,9082.$$

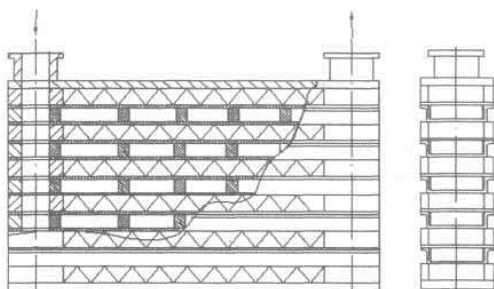


Рисунок 2.57 – Схема ПРТ з убудованим колектором і комбінованою насадкою в робочих каналах

На рисунку 2.58 подані експериментальні та розрахункові значення фактора тертя для сіткової насадки залежно від числа Рейнольдса. Залежність коефіцієнта теплопередачі та втрата тиску повітря в ПРТ із сітковою насадкою в каналі охолодження показані на рис. 2.59.

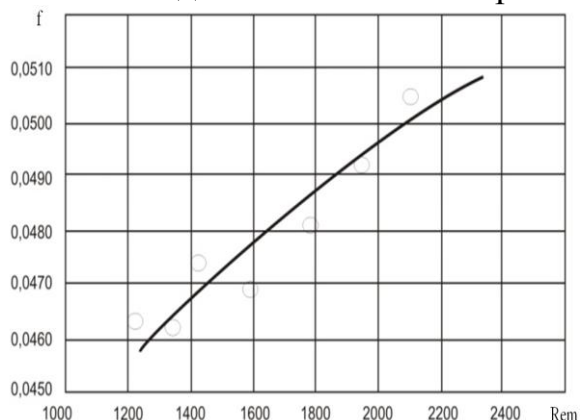


Рисунок 2.58 – Залежність фактора тертя повітря в насадці із сітки від числа Рейнольдса

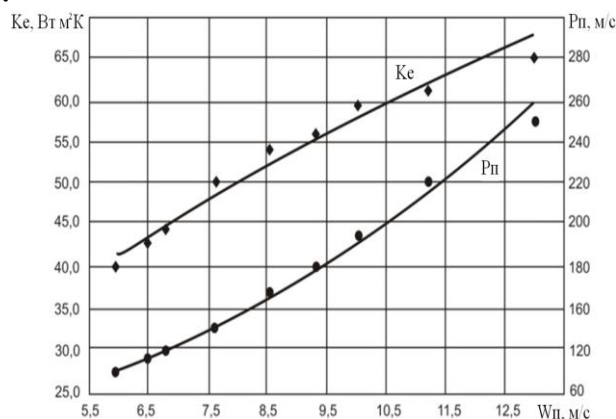


Рисунок 2.59 – Залежність коефіцієнта теплопередачі та втрати тиску повітря в пластинчасто-ребристому теплообміннику від швидкості повітря (швидкість масла $W_m = 0,17$ м/с)

У каналах охолодження ПРТ може бути встановлена насадка із дротової спіралі. Спіраль розміщена одним або двома шарами на проставному листі. На рисунку 2.60 наведений двошаровий пакет із дротової спіралі перед установами у ПРЕ.

Досліджували ПРТ, у каналах охолодження якого була встановлена насадка із дротової спіралі діаметром 5 мм. Спіраль установлювали уздовж і під кутом до потоку охолодженого повітря (рис. 2.61). У результаті досліджень аеродинамічного опору пластинчасто-ребристих теплообмінників із насадкою з боку повітря, виконаною у вигляді дротової спіралі, намотаної на проміжний проставний лист, визначені фактори тертя насадок. В одному випадку дротову спіраль намотували паралельно руху потоку повітря, в іншому – під кутом 16 градусів.

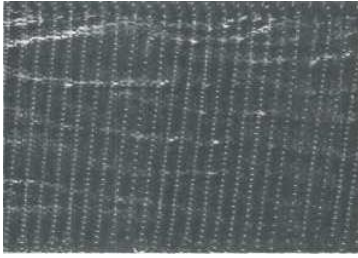
Фактори тертя залежно від числа Re узагальнені рівняннями:

– для дротової спіралі, розміщеної паралельно, $f_1 = 0,0045 Re^{0,33}$, $R^2 = 0,9434$;

– для дротової спіралі, розміщеної під кутом, $f_2 = 0,0168 Re^{0,18333}$, $R^2 = 0,8281$.

На рисунку 2.62 наведені експериментальні та розрахункові значення фактора тертя для насадок із боку повітря, виконаних у вигляді дротової спіралі, залежно від числа Рейнольдса. Розміщення насадки із дротової спіралі під кутом до потоку повітря збільшує опір і водночас підвищує коефіцієнт теплопередачі в ПРТ. На рисунках 2.63 і 2.64 подані залежності коефіцієнта теплопередачі ПРТ із насадками з різним розміщенням спіралі в каналі.

a)



б)

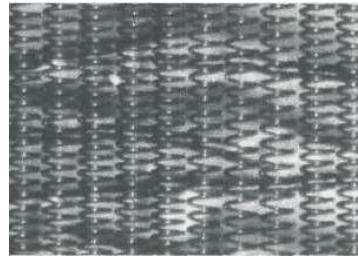


Рисунок 2.60 – Зовнішній вигляд двошарового пакета (а) та його фрагмента (б) каналу охолодження ПРЕ з насадкою із дротової спіралі

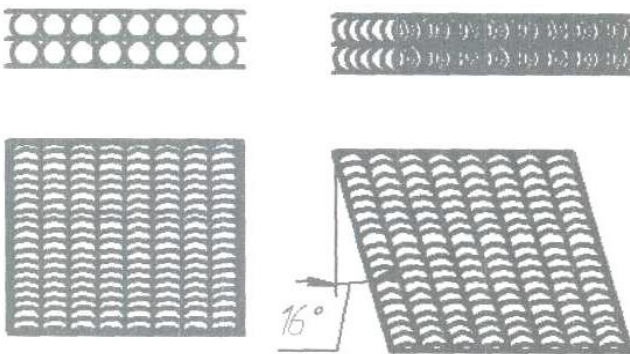


Рисунок 2.61 – Схема насадки із дротової спіралі в каналі охолодження ПРЕ

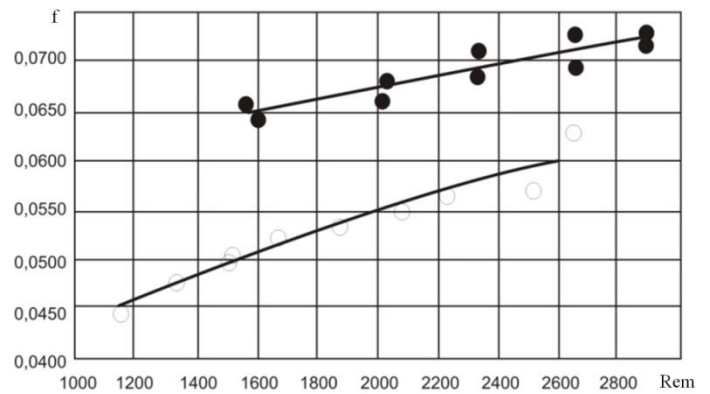


Рисунок 2.62 – Залежність фактора тертя насадок, виконаних у вигляді дротової спіралі, від числа Рейнольдса для повітря: напрямком спіралі паралельно – ○ і під кутом – ● потоку

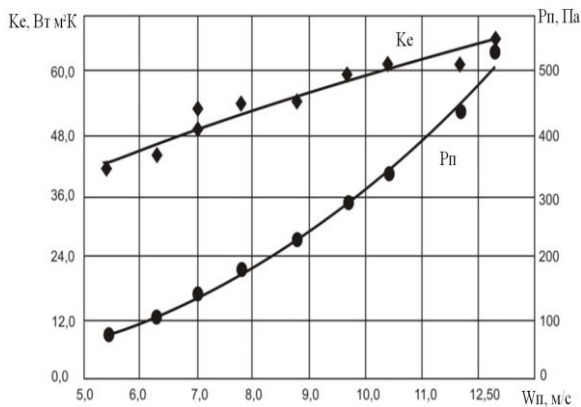


Рисунок 2.63 – Залежність коефіцієнта теплопередачі та втрати тиску повітря в пластинчасто-ребристому теплообміннику із дротовою спіраллю в каналі охолодження, розміщеною паралельно потоку, від швидкості повітря (швидкість масла $W_m = 0,16$ м/с)

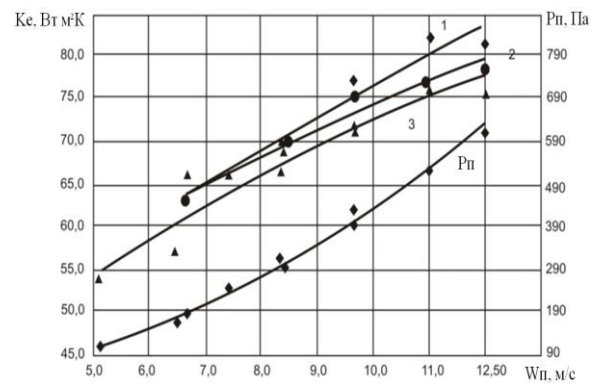


Рисунок 2.64 – Залежність коефіцієнта теплопередачі при різних швидкостях масла і втрати тиску повітря в пластинчасто-ребристому теплообміннику із дротовою спіраллю в каналі охолодження, розміщеною під кутом до потоку, від швидкості повітря (швидкість масла $W_m = 1-0,36; 0,2-0,265; 3-0,16$ м/с)

2.2.1.3. Вибір матеріалу для пластинчасто-ребристих теплообмінників, що працюють у вологій атмосфері вугільної шахти

Основними матеріалами для виготовлення ПРЕ є тонкі листи і стрічки для проставних листів ПРЕ, стрічки і сітки для прокатування або штампування насадки. Проставні листи виготовляють із низьковуглецевих сталей 08кп, сталі 20, Ст3, високолегованих сталей 10X18Н9, 20X13, спеціального алюмінієвого прокату АМЦПС. Насадку виготовляють зі сталевих стрічок 08кп, 10X18Н9, 12X18Н10, із фольги алюмінієвих сплавів АД1, АМЦПС і плетених сіток із дроту сталі 20 та 10X18Н9.

Деталі ПРЕ з'єднують високотемпературним паянням. Для його здійснення між деталями сталевих ПРЕ кладуть фольгу з міді або мідно-нікелевого сплаву МН19 товщиною 20–30 мкм. Для паяння алюмінієвих ПРЕ застосовують спеціальний прокат – лист або стрічку зі сплаву АМЦ, плаковані при прокатуванні тонким шаром припою із силуміну. Товщина шару становить не більше 0,1 від товщини основи (рис. 2.65).

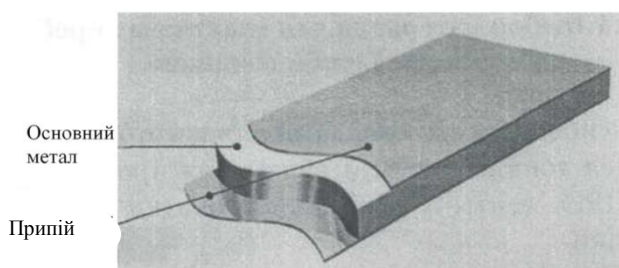


Рисунок 2.65 – Схема плакованого алюмінієвого листа АМЦПС

Нагрівання до температури паяння 1 100–1 200 °С сталевих ПРЕ і 620 °С алюмінієвих ПРЕ значно знижує механічні властивості матеріалів деталей теплообмінників. Відомості про властивості матеріалів та їх змін наведені в табл. 2.29.

Таблиця 2.29 – Механічні властивості матеріалів ПРЕ

Найменування матеріалу	Сортамент	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Межа міцності після паяння, МПа	Межа текучості після паяння, МПа
Сталь 20	Лист 3–6 мм	420	250	380	230
Сталь Ст3	Лист 3–6 мм	380	230	280	200
	Лист 1 мм	380	230	270	210
Сталь 08кп	Стрічка 0,3 мм	440	260	380	230
Сталь 10X18Н9	Лист 0,8 мм	580	2 300	500	130
	Стрічка 0,15 мм	1 130	1 100	5 100	130
Сталь 20X13	Стрічка 0,8 мм	560	300	1 260	1 200
	Стрічка 0,5 мм	630	330	1 300	1 100
	Стрічка 0,15 мм	560	350	1 200	980
Алюміній АМЦПС	Лист 0,8 мм	220	130	130	50
Алюміній АД1	Лист 3 мм	210	120	120	50

Гофровану насадку виготовляють зі стрічки товщиною 0,15–0,3 мм зі сталей 10X18Н9 і 08кп. Застосовують м'яку відпалену стрічку, що легко деформу-

ється й зберігає форму гофр після прокатування або штампування.

Для охолодження масла, повітря робочі канали ПРЕ формують із листової сталі Ст3 товщиною 1 мм. Товщину листа вибирають з огляду на робочий тиск та умови корозійного руйнування. Нижче наведений приклад розрахунку товщини проставного листа зі сталі Ст3 для ПРТ, що працює у вологій атмосфері вугільної шахти.

Мінімальна необхідна товщина проставного листа, мм, залежно від робочого тиску

$$S_0 = Kb\sqrt{P/[\sigma]},$$

де K – коефіцієнт, $K = f(1/b) = 0,5$; b – розрахункова ширина проставного листа, мм; P – робочий тиск середовища, кгс/см²; $[\sigma]$ – напруження, що допускається для сталі Ст3пс, кгс/см² (з урахуванням високотемпературного нагрівання у вакуумній печі);

$$S_0 = 0,5 \cdot 3,8b\sqrt{7/1060} = 0,154.$$

Розрахункове збільшення до товщини проставного листа

$$C = C_1 + C_2,$$

де C_1 – збільшення на корозію, мм.

$$C_1 = PT,$$

де P – проникність середовища у вуглецеву сталь.

З огляду на умови експлуатації беремо

$$P = 0,1 \text{ мм/рік};$$

T – розрахунковий термін служби апарата, років.

Беремо $T = 7$ років

$$C_1 = 0,1 \cdot 7 = 0,7 \text{ мм};$$

C_2 – мінусовий допуск на товщину листа, мм.

$$C = 0,7 + 0,12 = 0,82 \text{ мм}.$$

Розрахункова товщина проставного листа

$$S_p = S_0 + C = 0,154 + 0,82 = 0,974 \text{ мм}.$$

Товщина проставного листа взята за 1 мм.

Таким чином, припуск за товщиною листа на компенсацію корозії становить 0,7 мм. Крім того, міцність сталевих листів при високотемпературному паянні знижується (див. табл. 2.29) під дією температури. Для компенсації цього зниження встановлюється припуск на товщину листа. Отже, лист робочого каналу має товщину, на 0,8 мм більшу, ніж вимагає розрахунок на міцність.

Алюмінієві сплави мають певні переваги при виготовленні ПРТ. Основні переваги: висока теплопровідність, невелика питома вага і корозійна стійкість в атмосферних умовах. Однак порівняно з нержавіючими сталями алюмінієві сплави мають два істотних недоліки: значно меншу міцність та схильність до корозії в лужних середовищах. Це виключає можливість застосування алюмінієвих ПРТ в умовах вологих підземних виробок і в запиленних кар'єрах. Невелика міцність матеріалу після паяння дозволяє застосовувати паяні алюмінієві ПРТ при робочому тиску не більше ніж 2 МПа.

2.2.1.4. Особливості застосування сталі 20X13 для паяних пластинчасто-ребристих теплообмінників компресорних установок

Для виготовлення ПРЕ застосовують стрічку у відпаленому м'якому стані. У такому стані зі стрічки можна штампувати деталі ПРЕ. Накатування насадки роликками утруднене через значну величину межі текучості. Після нагрівання до температури вище 1 100 °С та охолодження у вакуумній печі межа текучості стрічки підвищується до 1 100 МПа, відносне подовження знижується до 3–4 %. У такому стані стрічки експлуатація виготовлених із неї ПРТ небезпечна через можливість крихкого руйнування під час вібрації та механічного впливу.

Високотемпературне нагрівання у вакуумі тонкої стрічки сприяє видаленню газів із металу і може підвищити її пластичні властивості. Водночас таке нагрівання викликає значне зростання зерна і призводить до окрихчування. Комплексними дослідженнями визначено вплив на механічні властивості та структуру сталі 20X13 подальшого після високотемпературного нагрівання у вакуумі відпускання. Зразки для випробувань на розтягування й ударну в'язкість виготовляли із дроту товщиною 40 мм. Зразки піддавали термічному обробленню за такими режимами: нагрівання – до 1 120 °С, витримка – 15 хв, охолодження у вакуумній печі – до 20 °С; нагрівання – до 1 120 °С, витримка – 15 хв, охолодження у вакуумній печі – до 20 °С, нагрівання – до 700 °С, витримка – 60 хв, охолодження у вакуумній печі – до 20 °С; нагрівання – до 1 120 °С, витримка – 15 хв, охолодження у вакуумній печі – до 20 °С, нагрівання в електричній муфельній печі – до 700 °С, витримка – 60 хв, охолодження на повітрі.

За допомогою металографічних досліджень на оптичних і растровому електронному мікроскопах визначені такі зміни структури сталі 20X13 після вищенаведених нагрівань. У стані поставки сталь має дрібнозернисту (10 балів) ферито-перлітну структуру з оксидними і силіцидними включеннями (3 бали). Високотемпературне нагрівання до 1 120 °С і подальше охолодження в камері вакуумної печі з водоохолоджувальними стінками призводить до утворення грубозернистої (5 балів) мартенситної структури, що крихко руйнується на межах зерен як при ударному навантаженні, так і при розтягуванні. Високотемпературне відпускання за температури 700 °С із витримкою 60 хв під час нагрівання та охолодження у вакуумній печі приводить до утворення сорбітної структури і відновлення в'язкості. У зламі після випробувань на удар переважає в'язке транскристалічне руйнування з локальними ділянками крихкого руйнування на межах зерен.

Проведені дослідження довели, що сталь 20X13 дозволяє за допомогою термічного оброблення паяних ПРЕ одержати міцні та корозієстійкі ПРТ.

2.2.1.5. Удосконалення способів усунення дефектів теплообмінних апаратів

Загальна довжина паяних швів у ПРТ, що підлягають випробуванням на герметичність і міцність, становить сотні метрів. Наприклад, у ПРТ, осердя

якого складається із секції ПРЕ розміром 150×400×850 мм, довжина герметичних міцних швів, що формують робочі канали, становить 80 м. При досконалій технології, організації виробництва та контролю операцій можна уникнути появи браку. Однак практично повністю уникнути утворення мікро- і макродефектів неможливо. Причини їх утворення різні, і дефекти виявляються на різних стадіях контролю.

Після візуального контролю паяний ПРЕ випробовують стисненим повітрям за тиску 0,1–0,2 МПа із зануренням у ванну з водою. Негерметичні з'єднання виявляються в місцях виходу повітря (рис. 2.66).



Рисунок 2.66 – Випробування на герметичність паяного ПРЕ

Для усунення мікротечій застосовують анаеробні герметики та герметики на основі епоксидних смол.

Анаеробні герметики дуже чутливі до металів – заліза, міді, нікелю, кобальту, марганцю. Ці метали щодо герметика вважаються активними, у контакті з ними процес затверднення прискорюється. Алюміній та його сплави вважаються нормальними щодо герметика. Якщо час затверднення герметика на активних по-

верхнях обчислюється хвилинами, то на нормальних – годинами. Деякі відомості про анаеробні герметики наведені в табл. 2.30.

Поряд з анаеробними герметиками для усунення дефектів застосовують рідинотекучий термостійкий ущільнювальний матеріал ДІАМАНТ ДИХТОЛ. Він являє собою однокомпонентний рідинотекучий, прозорий герметик, що затвердіває за нормальної температури. Герметик розроблений на епоксидно-смолистій основі. ДІАМАНТ ДИХТОЛ стійкий у бензині, дизельному паливі, маслі, аміаку, природному газі. Найбільш сприятлива температура затверднення 20 °С. Час зберігання в закритому посуді необмежений. Дихтол, що загус, може бути розріджений ацетоном у пропорції не більше ніж 10 %. Він пожегобезпечний. Після затверднення пожегобезпечний. Основні відомості про герметики наведені в табл. 2.31.

Таблиця 2.30 – Властивості анаеробних герметиків

Найменування герметика	Анатерм 1	Анатерм 1в	Анатерм 17
Розмір мікротріщин, макс. мм	0,07	0,07	0,6
Густина, кг/м	1 180	1 190	1 250
В'язкість при 20 °С, м ² /с 10 ⁻⁶	10–17	8–15	20–60
Час набирання повної міцності при 20 °С, годин	24	24	8
Температура експлуатації, °С	-193...+150	-193...+150	-60...+120
Межа міцності при зрушенні, МПа	4	3,3	5

Таблиця 2.31 – Властивості герметика ДІАМАНТ ДИХТОЛ

Найменування	Стандарт	WF	HTR
Розмір мікротріщин, макс. мм	0,1	0,1–0,5	0,1
В'язкість при 20 °С, м ² /с 10 ⁻⁶	10–12	90–100	12–14
Час набирання повної міцності при 20 °С, годин	24	24	8
Температура експлуатації, °С	–170...+200	–170...+200	–170...+500
Опір тиску, МПа	35	35	35

Технологія усунення дефектів у ПРТ за допомогою герметика полягає в такому. Після випробувань теплообмінник сушать у сушильній шафі або печі за температури > 120 °С для повного видалення вологи. Після сушіння ПРТ охолоджують до температури 30–35 °С. Установлюють заглушки на патрубки ПРТ і вакуумують порожнини каналів до розрідження 13–130 Па. Місця теч обливають за допомогою шприца ацетоном. Потім шприцом наносять герметик. Після 5–6 хв витримки припиняють вакуумування і повторно наносять шприцом герметик. Для затверднення здійснюють витримку 24 години. За необхідності прискорення процесу затверднення ПРТ нагрівають у шафі до 100–120 °С 5–6 годин.

Наведена вище технологія усунення дефектів за допомогою герметика застосовна і для паяних трубчастих теплообмінників.

2.2.2. Випробування теплообмінних апаратів компресорних установок і закономірності зміни їх характеристик

2.2.2.1. Способи та устаткування для випробування теплообмінних апаратів

Випробування теплообмінних апаратів компресорних установок проводять на різних стадіях виробництва та експлуатації.

На стадії розроблення й освоєння нової конструкції теплообмінного апарата, що містить нові теплообмінні поверхні, нові теплоносії або нове їх поєднання, дослідні зразки випробовують на стендах. На стендах застосовують дві схеми випробувань: охолодження гарячого теплоносія водою, охолодження гарячого теплоносія повітрям.

На рисунку 2.67 наведена схема, а на рисунку 2.68 – загальний вигляд двоконтурного стенда з охолодженням теплоносія водою. На стенді досліджують теплопередачу та гідравлічний опір водяних маслоохолоджувачів із різними насадками в масляних каналах. До складу стенда входять замкнені масляний і водяний контури. Масло, підігріте до необхідної температури, надходить у водомасляний теплообмінник, в якому вода відводить теплоту від масла. Для забезпечення постійного температурного режиму вода надходить у водоохолоджувач із регульованим повітряним охолодженням, а потім – назад у водяний бак.

а)



б)

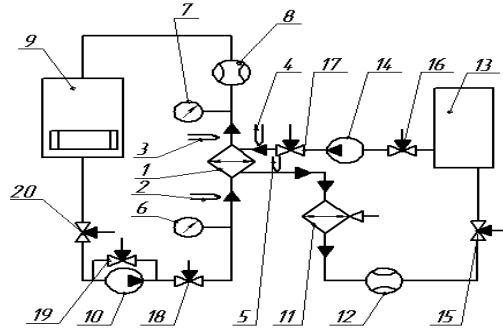


Рисунок 2.67 – Зовнішній вигляд боксу з випробувальною компресорною машиною (а) і схема стенда для дослідження теплопередачі та гідравлічного опору в теплообміннику компресорної машини (б): 1 – теплообмінник; 1, 2, 3, 4, 5 – термомпари; 6, 7 – манометри; 8 – витратомір масла; 9 – масляний бак із нагріванням; 10 – масляний насос; 11 – водоохолоджувач; 12 – витратомір H_2O ; 13 – бак із водою; 14 – водяний насос; 15, 16, 17, 18, 19, 20 – вентилялі

Для визначення коефіцієнта теплопередачі K у водомасляному теплообміннику тепловий потік визначають за витратою масла і різницею температур масла між входом та виходом. Тепловий потік, що відводиться водою, при визначенні K не враховують, тому що нерівність теплових потоків масла та води значна через велику похибку вимірювання різниці температур води на вході та виході, що має значення $\sim 2-3$ °С. На стенді поряд із коефіцієнтом теплопередачі визначають гідравлічний опір масляного потоку за однакової витрати води. Принципова схема стенда для дослідження K з охолодженням гарячого теплоносія повітрям наведена на рис. 2.69. На такому стенді проводять дослідження теплопередачі, аеродинамічного та гідравлічного опорів повітряних маслоохолоджувачів із різними насадками в масляних і повітряних каналах.



Рисунок 2.68 – Зовнішній вигляд стенда для теплотехнічних випробувань теплообмінних апаратів

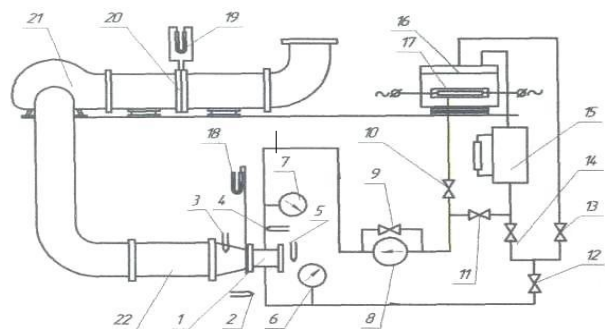


Рисунок 2.69 – Схема стенда для дослідження теплопередачі, аеродинамічного та гідравлічного опору в повітряних маслоохолоджувачах: 1 – досліджуваний теплообмінник; 2-5 – термомпари; 6, 7 – манометри; 8 – масляний насос; 9, 10, 11, 12, 13 і 14 – вентилялі; 15 – витратомір масла; 16 – масляний бак; 17 – електронагрівачі; 18, 19 – мікроманометри; 20 – витратомір повітря; 21 – відцентровий вентилятор; 22 – осьовий вентилятор

Під час проектування теплообмінників із повітряним охолодженням потрібно знати характеристику вентилятора. Характеристика вентилятора графічно виражає зв'язок між основними параметрами його роботи. Повна характеристика вентилятора певних геометричних розмірів при переміщенні повітря незмінної густини та незмінної частоти обертання виражає залежність між продуктивністю L , з одного боку, тиском P , споживаною потужністю N і ККД η – з іншого.

Найбільш важливим є графік залежності між тиском і продуктивністю – так звана характеристика тиску вентилятора. Повні характеристики вентилятора наочно відбивають особливості їх роботи і дозволяють вибрати для конкретного теплообмінника економічний вентилятор. Одержати розрахунковим шляхом досить точну характеристику вентилятора важко, тому характеристики будуються на основі даних випробувань. Повну характеристику вентилятора через складність цієї операції одержують у лабораторних умовах із використанням спеціальних установок та апаратури. На рисунку 2.70 подана принципова схема аеродинамічного стенда випробувань осьових вентиляторів. На рисунку 2.71 показаний загальний вигляд стенда.

До стенда для аеродинамічних випробувань вентиляторів, наведеного на рис. 2.70, входять витратомір 1 (сопло Вентурі) з коефіцієнтом витрати $a = 0,98-0,99$, повітропровід у вигляді камери 2 із приймачами тиску, дросельний пристрій 3, випрямний дифузор 4 з роздільними стінками і ґратка 5. Для подолання опору повітропроводів служить відцентровий вентилятор 6.

Випробувальний вентилятор 7 обертається за допомогою електродвигуна 8. Для вимірювання статичного тиску на витратомірі та в камері застосовують мікроманометри підвищеної точності 9 (МКВ-250-0.02) з точністю виміру тиску 0,1 Па. Температура довкілля вимірюється термометром із ціною поділки 0,1 °С.

Для практичного застосування, за даними випробувань, будують графіки залежностей статичного тиску P_s вентилятора і потужності N , споживаної вентилятором на переміщення повітря, від продуктивності вентилятора L .

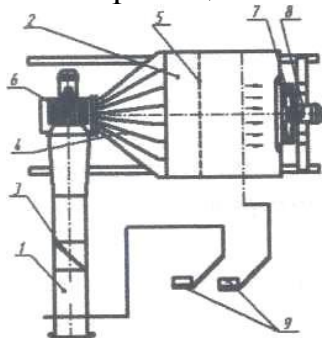


Рисунок 2.70 – Схема аеродинамічного стенда для випробувань осьових вентиляторів



Рисунок 2.71 – Загальний вигляд стенда для випробувань осьових вентиляторів

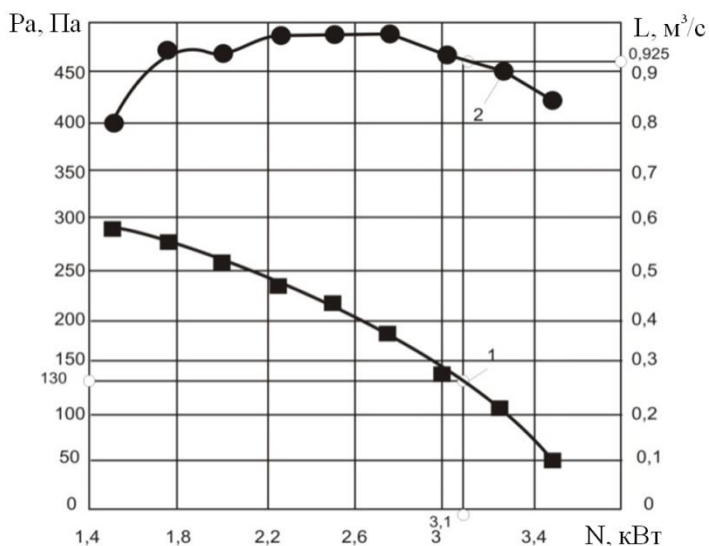


Рисунок 2.72 – Типова графічна характеристика осьового вентилятора:
1 – статичний тиск; 2 – потужність

Вентилятора $P_s = 135$ Па дорівнює втраті тиску повітря в теплообміннику $\delta P = 135$ Па. Величина потужності N , споживаної вентилятором на переміщення повітря, при цьому дорівнює 925 Вт. При використанні як привода вентилятора електродвигуна його встановлена потужність повинна бути на 12–14 % більшою ніж потужність, споживана вентилятором на переміщення повітря.

На рисунку 2.72 наведені графіки $P_s = f(L)$ та $N = f(L)$ для осьового вентилятора виробництва фірми Multi-Wing марки 623/ 10-10/35/3HR/PAG.

Тут показано, як користуватися цими графіками. Як приклад, розглянутий теплообмінник, що має втрату тиску повітря $\delta P = 135$ Па при витраті повітря через теплообмінник $L = 3,1$ м³/с. При заданій витраті повітря статичний тиск вентилятора повинен дорівнювати або бути більшим від опору теплообмінника. У наведеному прикладі при витраті повітря $L = 3,1$ м³/с статичний тиск венти-

2.2.2.2. Методика визначення та закономірності зміни характеристик теплообмінних апаратів

Стендові випробування теплообмінних апаратів (ТА) дозволяють визначити характеристики нових конструкцій ТА, порівняти їх із відомими і внести корективи для одержання оптимального результату.

Численні методи порівняння теплопередавальних поверхонь ґрунтуються на тому, що корисний ефект – передача теплоти – супроводжується витратами енергії на подолання опорів по одному або обох трактах теплообмінника. Найбільш просте оцінювання зіставлення теплопередавальних поверхонь таке:

$$E = \frac{Q}{N},$$

де E – енергетичний коефіцієнт; Q – тепловий потік, переданий поверхнею; N – потужність, затрачувана на подолання гідравлічного опору.

Умови зіставлення теплообмінників за конструктивними показниками такі: 1) переданий тепловий потік для всіх апаратів однаковий ($Q = \text{idem}$); 2) сумарні витрати енергії на подолання опору під час руху теплоносіїв $\sum N = \text{idem}$; 3) тепла ефективність апаратів $E = \text{idem}$; 4) масові витрати гарячого і холодного теплоносіїв $G_r = \text{idem}$, $G_x = \text{idem}$; 5) середній температурний напір

$\Delta T_{\text{лог}} = \text{idem}$.

Подані на рис. 2.73 результати порівняння чотирьох теплообмінників показали, що дротове спіральне оребрення, яке турбулізує потік повітря і тим самим підвищує тепловіддачу, поступається гладкій гофрованої насадці великої компактності. Ймовірно, це пов'язано з тим, що при турбулізації потоку тепловіддача збільшується меншою мірою, ніж зростання опору.

Під час випробувань (рис. 2.73) порівнювали характеристики таких ТА:

1) сталевий ПРТ МО з катаною насадкою зі стрічки з висотою гофр 3 мм, установлені двома шарами через прокладку, в повітряному каналі і гофрованої дротяної сітки – в масляному каналі;

2) сталевий ПРТ МО з насадкою із дротової спіралі, накрученої на проміжний лист під кутом до руху повітря, в повітряному каналі і гофрованої дротяної сітки – в масляному каналі;

3) сталевий ПРТ МО з насадкою із дротової спіралі, накрученої на проміжний лист паралельно руху повітря, в повітряному каналі і гофрованої дротяної сітки – в масляному каналі;

4) сталевий ПРТ МО з катаною насадкою із дротяної сітки в повітряному і масляному каналах.

Величини аеродинамічних опорів найбільш ефективних теплообмінників 1 і 4 наведені на рис. 2.74. З рисунка бачимо, що опір сталевого МО з катаною насадкою зі стрічки за рухом повітря набагато нижчий від опору сталевого МО з катаною насадкою із дротяної сітки. Це й обумовлює невеликі значення питомої потужності на прокачування повітря в МО з катаною насадкою зі стрічки.

Порівняльні дослідження ефективності сталевих ПРТ МО з катаною насадкою зі стрічки з висотою гофр 3 мм, установлені двома шарами через прокладку в повітряному каналі, і гофрованої дротяної сітки в масляному каналі з алюмінієвим ПРТ МО з хвилястою насадкою на повітряному каналі та просічною насадкою в масляному каналі наведені на рис. 2.75. Бачимо, що сталевий ПРТ із двошаровою гладкою насадкою має в області значень питомої потужності до 12 кВт/м³ меншу ефективність порівняно з алюмінієвим, а вище 12 кВт/м³ – більш високе значення ефективності порівняно з алюмінієвим і меншим опором повітря (рис. 2.76). Це можна пояснити тим, що при проходженні повітря в каналах із гладкою насадкою з малими швидкостями встановлюється ламінарний режим руху, що характеризується низькою тепловіддачею. Надалі зі збільшенням швидкості повітря інтенсивність тепловіддачі різко зростає. У разі із хвилястою насадкою в повітряному каналі турбулізація потоку за допомогою хвилеподібних ребер відбувається й при невеликих швидкостях, і, ймовірно, тому інтенсивність тепловіддачі підвищується зі збільшенням швидкості не так швидко. Тому при конструюванні пластинчасто-ребристих теплообмінників намагаються уникати ламінарного режиму під час проходження повітря.

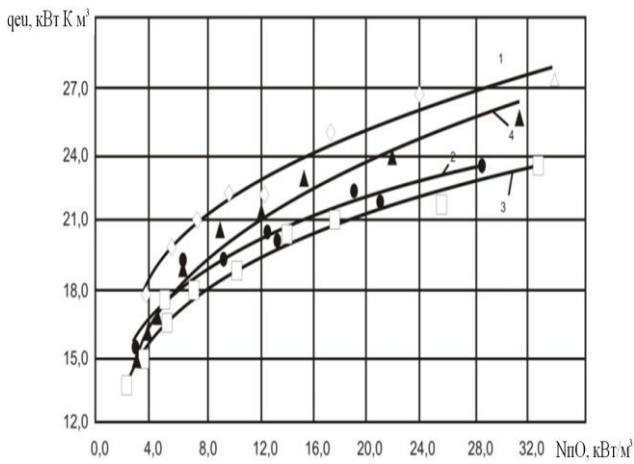


Рисунок 2.73 – Залежність питомих теплових потоків повітряних масло- охолоджувачів МО від питомої потужності на прокачування повітря при швидкості масла $W_m = 0,16$ м/с

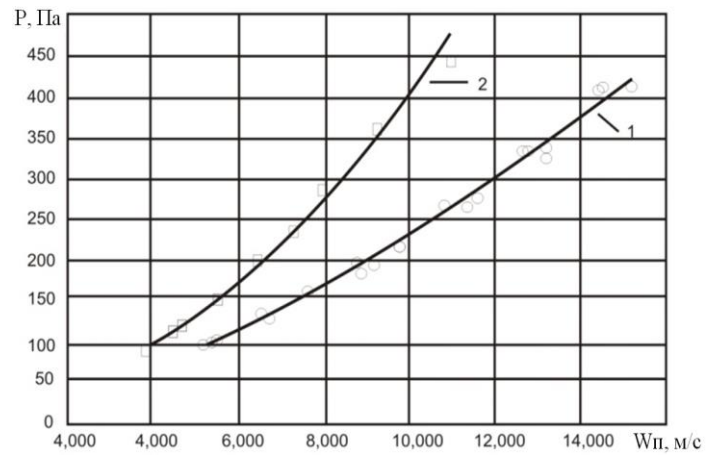


Рисунок 2.74 – Втрата тиску охолодженого повітря в ПРТ із насадкою в повітряному каналі з гладкої гофрованої стрічки (1) і гофрованої сітки (2)

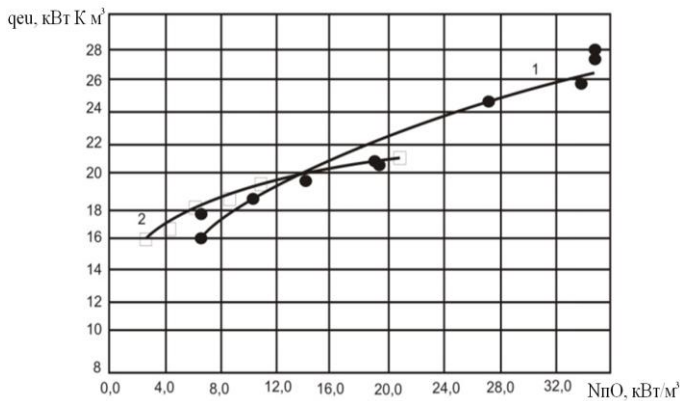


Рисунок 2.75 – Залежність питомих теплових потоків сталевого ПРТ (1) із гладкою двошаровою насадкою та алюмінієвого ПРТ (2) з хвилястою насадкою від питомої потужності на прокачування повітря при швидкості масла $W_m = 0,16$ м/с

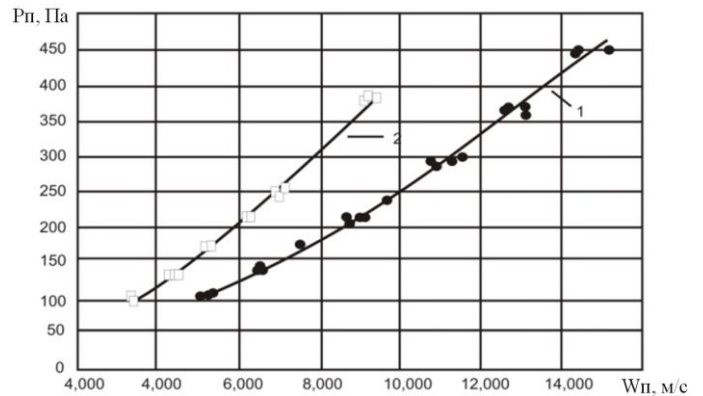


Рисунок 2.76 – Залежність втрати тиску сталевого ПРТ (1) із гладкою двошаровою насадкою та алюмінієвого ПРТ (2) з хвилястою насадкою від швидкості повітря

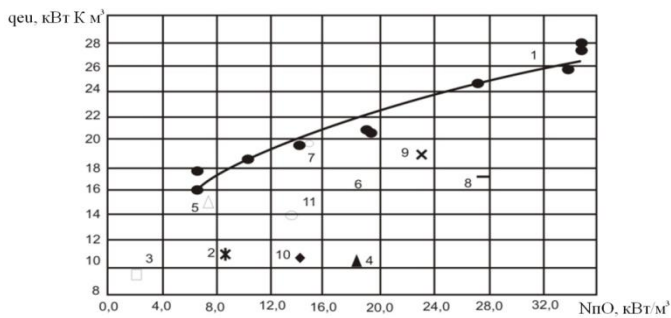


Рисунок 2.77 – Питомі теплові потоки маслоохолоджувачів із різною комбінацією поверхонь

На рисунку 2.77 наведено порівняння питомих теплових потоків маслоохолоджувачів із вищезазначеною пер-спективною комбінацією поверхонь та комбінаціями поверхонь, що випускалися раніше і на сьогодні.

У таблиці 2.32 наведені комбінації теплообмінних поверхонь для різних маслоохолоджувачів. Із графіка бачимо, що маслоохолоджувачі (2, 4, 8 і 10), в каналах яких застосовані поверхні з гладкими прямими ребрами та невеликою компактністю, мають і невисоку теплову ефективність. Збільшення компактності поверхонь із гладкими прямими ребрами підвищує ефективність маслоохолоджувачів (6, 7 і 9). Компактність поверхонь маслоохолоджувача 11 не перевищує компактності поверхонь маслоохолоджувачів 2 і 4, але його канали мають прямокутну форму, інтенсивність тепловіддачі в яких вища, ніж у каналах будь-якої іншої форми, що обумовлює його високу ефективність. Застосування поверхні з дротяної сітки в масляних каналах значно збільшує ефективність маслоохолоджувачів (3 і 5). Комбінація двошарової великої компактності поверхні з гладкими прямими ребрами висотою $h = 3$ мм у повітряних каналах і поверхні з дротяної сітки в масляних каналах дозволяє одержати маслоохолоджувачі з найбільшою ефективністю (1). У таблиці 2.32 наведені дані, що ілюструють ефективність застосування оптимальної комбінації теплообмінних поверхонь на прикладах технічних характеристик сталевих ПРТ одного призначення з різними теплообмінними поверхнями. Як бачимо з таблиці, використовуючи вибір відповідної комбінації теплообмінних поверхонь, можна вдвічі зменшити масу теплообмінного апарата.

На рисунку 2.78 показані для порівняння стара й нова конструкції блоків міжступеневих повітроохолоджувачів поршневого компресора ЗВШ1, 6-3/46.



Рисунок 2.78 – Блок міжступеневих повітроохолоджувачів КУ ЗВШ1, 6-3/46 старої (а) і нової (б) конструкції

Таблиця 2.32 – Комбінації поверхонь у маслоохолоджувачах ПРТ

Найменування компресорної установки або макета	Тип поверхні	
	на боці повітря	на боці масла
1	2	3
1. Дослідний зразок	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 3$ мм. Компактність – $1\,813\text{ м}^2/\text{м}^3$	Із дротяної сітки. Компактність – $1\,370\text{ м}^2/\text{м}^3$
2. УКГШ-5/7	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,339\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 3$ мм. Компактність – $1\,813\text{ м}^2/\text{м}^3$
3. УКГШ-10/7	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,339\text{ м}^2/\text{м}^3$	Із дротяної сітки. Компактність – $1\,370\text{ м}^2/\text{м}^3$
4. УКГШ-15/7	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,339\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 3$ мм. Компактність – $1\,813\text{ м}^2/\text{м}^3$
5. НВЕ-10/8	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,339\text{ м}^2/\text{м}^3$	Із дротяної сітки. Компактність – $1\,370\text{ м}^2/\text{м}^3$
6. НВЕ-15/8	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, ущільнена, висотою $h = 6$ мм. Компактність – $1\,779\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, ущільнена, висотою $h = 3$ мм. Компактність – $2\,098\text{ м}^2/\text{м}^3$
7. НВЕ-20/8	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, ущільнена, висотою $h = 6$ мм. Компактність – $1\,779\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, ущільнена, висотою $h = 3$ мм. Компактність – $2\,098\text{ м}^2/\text{м}^3$
8. ВВ-32/8	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,339\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, висотою $h = 3$ мм. Компактність – $1\,813\text{ м}^2/\text{м}^3$
9. ВВ-50/8	Подвійна, трикутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 3$ мм. Компактність – $1\,813\text{ м}^2/\text{м}^3$	Трикутної форми з гладкими прямими ребрами, ущільнена, висотою $h = 3$ мм. Компактність – $2\,098\text{ м}^2/\text{м}^3$
10. Макет № 1 (алюмінієвий)	Подвійна, евольвентної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 6$ мм. Компактність – $778\text{ м}^2/\text{м}^3$	Евольвентної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,022\text{ м}^2/\text{м}^3$
11. Макет № 2 (алюмінієвий)	Прямокутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,450\text{ м}^2/\text{м}^3$	Прямокутної форми з гладкими прямими ребрами висотою $h = 4$ мм. Компактність – $1\,450\text{ м}^2/\text{м}^3$

2.2.2.3. Методи розрахунку та конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок

Коефіцієнт теплопередачі, віднесений до площі поверхні охолодженого середовища, визначається з відомого рівняння:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha \cdot \eta)_x} + \frac{F_x}{(F \cdot \alpha \cdot \eta)_z} + R_3},$$

де $\alpha = \eta \frac{\lambda}{D}$ – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); λ – коефіцієнт теплопровідності робочого середовища, Вт/(м·К); D – визначальний розмір, м; η – ефективність площі поверхні теплообміну; R_3 – теплові опори забруднень, (м²·К)/Вт.

Теплові опори забруднень визначаються як табличне значення. Для неоребраних поверхонь $\eta = 1$. Ефективність площі поверхні теплообміну оребраних поверхонь визначається зі співвідношення

$$\eta = 1 - \frac{F_p \cdot (1 - \eta_p)}{F},$$

де F_p – площа поверхні ребер, м²; η_p – ефективність оребрення.

Ефективність оребрення визначається за рівнянням

$$\eta_p = \frac{\exp(mi) - \exp(-mi)}{(\exp(mi) + \exp(-mi)) \cdot mi},$$

де $mi = L_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\delta_p \cdot \lambda_p}}$ – параметр; L_p – довжина ребра, м; δ_p – товщина ребра, м; λ_p – коефіцієнт теплопровідності матеріалу ребра, Вт/(м·К).

У разі якщо одержане значення k менше від розрахункової величини, здійснюються необхідні зміни в конструкції теплообмінника з метою збільшення поверхні теплообміну F , швидкостей робочих середовищ і т. п.

У разі якщо одержане значення k менше від розрахункової величини, здійснюються необхідні зміни в конструкції теплообмінника з метою збільшення поверхні теплообміну F , швидкостей робочих середовищ і т. п.

Результати випробування робочого каналу макета теплообмінника з насадкою із сітки наведені в табл. 2.33. Початок пластичної деформації листа визначали за різким зниженням тиску без руйнування зразка. Процес навантаження та руйнування випробовуваних макетів відбувається кількома послідовними етапами: вигинання диска між гребенями сітки-насадки, випрямлення ниток сітки із частковим руйнуванням паяних з'єднань у місцях переплетення дротів, розривання дротів сітки, деформація диска, руйнування диска.

Таблиця 2.33 – Результати випробування робочого каналу макета теплообмінника з насадкою із сітки

Товщина диска, мм	Тиск на початку деформації каналу, МПа	Тиск при руйнуванні каналу, МПа
1	2	3
0,15	7,6	7,6
0,15	6,2	6,4

Продовження таблиці 2.33

1	2	3
0,15	5,8	7,2
0,15	6,0	5,8
0,15	6,0	6,0
0,45	8,6	11,2
0,45	8,2	8,6

Для порівняння провели паяння контрольних макетів теплообмінників. Аналіз зруйнованих зразків показав, що в місці зіткнення насадки з листом формується якісне паяне з'єднання з гарним жолобником (рис. 2.79 а). Знакозмінна деформація призводить до руйнування алюмінієвих деталей із характерним рельєфом поверхні руйнування (рис. 2.79 б). Це накладає обмеження на використання алюмінієвих теплообмінників.

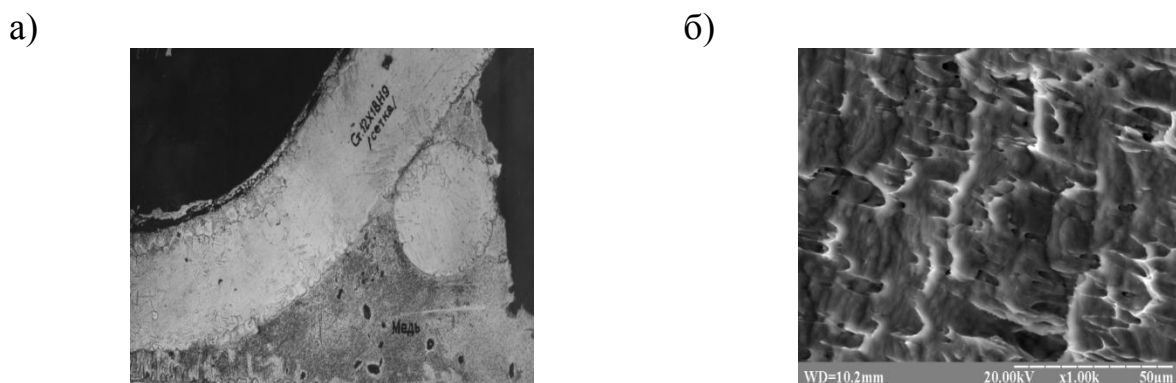


Рисунок 2.79 – Структура паяного з'єднання сітки з листом (а) і мікроструктура ямкового руйнування алюмінієвої деталі після знакозмінної деформації (б)

Руйнування зразків відбувалося через розривання дротів сітки, а не паяного з'єднання, тобто в даній комбінації міцність каналу визначається міцністю сітки, а не міцністю паяного з'єднання сітки з листом. Випробування маслоохолоджувача після очищення поверхні повітряних каналів показало, що теплопередача відновлена частково, тому що забруднення відбулося і в масляних каналах (рис. 2.80 а). Число забруднених каналів $N_{кз} = 685$. Загальне число каналів $N_{к} = 14\ 700$.

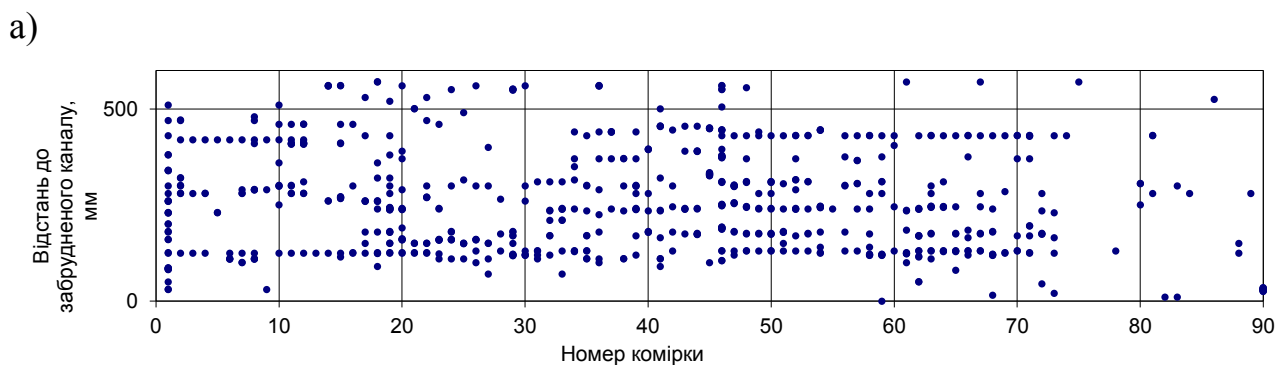


Рисунок 2.80 – Результати випробувань ступеня забруднення повітряних каналів теплообмінника маслоохолоджувача (а) і результати термографічного дослідження теплообмінника наприкінці терміну експлуатації (б)

б)

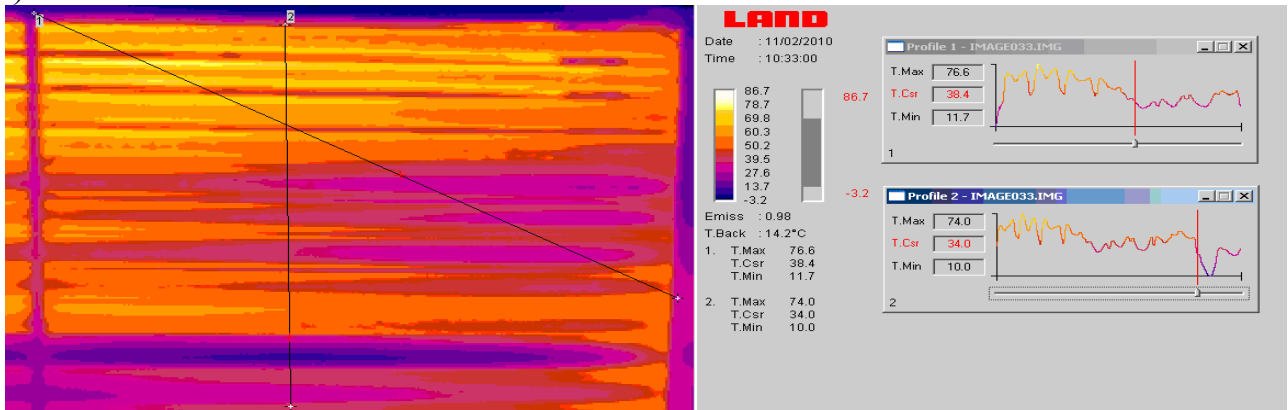


Рисунок 2.80, аркуш 2

Дослідження впливу забруднення на ефективність роботи маслоохолоджувача, проведене на аеродинамічному стенді з масляним контуром, порівняно з чистим охолоджувачем, що не працював, показало, що питомий тепловий потік чистого маслоохолоджувача на 10–15 % більший, ніж забрудненого. Результати термографічного дослідження теплообмінника (рис. 2.80 б) також свідчать про нерівномірну роботу теплообмінних поверхонь і наявність градієнтів температури. Характеристики системи охолодження з тепловою потужністю 4–110 кВт подані в табл. 2.34.

Таблиця 2.34 – Технічні характеристики системи охолодження

Теплова потужність, кВт	Теплова потужність маслоохолоджувача, кВт	Теплова потужність повітроохолоджувача, кВт	Витрата масла, л/хв	Витрата повітря, м ³ /хв	Потужність вентилятора, кВт	Витрата охолодженого повітря, м ³ /год
4–7,5	3,5–6,2	0,6–1,1	12–20	0,6–1,2	0,18	1 550
7,5–15	6,2–12,5	1,1–2,2	20–28	1,2–2,5	0,25	3 000
18–22	15,6–18,7	2,7–3,2	33–40	2,9–3,6	0,21	3 400
30	25	4,3	43	4,8	0,35	5 100
37	30	6	45	5,6	0,54	6 700
45–55	38–47	7–8	45–60	6,3–7,1	0,65	8 100
75	63	11	75	11,5	0,77	9 100
90–110	78–94	14–16	90–110	14–17	0,81	10 000

2.3. Розроблення методів підвищення надійності деталей та вузлів шахтних компресорних машин шляхом застосування високотемпературного вакуумного паяння

2.3.1. Технологія і способи паяння із широким паяльним зазором

Металургійні особливості формування паяного шва з наповнювачем у широкому зазорі дозволяють забезпечити високі механічні властивості з'єднання.

Для закріплення порошкового припою у вигляді валика готують пасту зі зв'язувальною речовиною – склад № 1 і 2 (табл. 2.35). Паста наноситься з тюрбики або шприцом. При застосуванні автовакуумного нагрівання для паяння із широким зазором передбачаються герметизація зварюванням периметра шва, видалення газів сорбентом і подавання розплаву припою з допоміжної камери. При такій схемі припій, перебуваючи в технологічній порожнині всередині деталі, розплавляється після нагрівання всієї збірки до температури паяння і відповідно після видалення сорбентом газу із зазору. Залишкові, не поглинені сорбентом, гази розплавлений припій витісняє в технологічну порожнину із сорбентом. Під час охолодження розплавлений припій підживлює метал шва та кристалізується останнім. За такою схемою виконують паяння заготовок сталевих циліндрів компресорів високого тиску (рис. 2.81 а).

Однак таке розміщення деталей у складанні не завжди можливе. Типова схема складання деталей для автовакуумного паяння показана на рис. 2.81 б. Деталі, що паяються, 1 складають із необхідним розміром зазору, заповнюють його наповнювачем 3 і герметизують по периметру зварюванням. До зазору приєднують за допомогою зварювання сорбційний насос 2 і живильник 4. У живильнику розміщують припій 7 і флюс 6, що під час розплавлювання перешкоджає взаємодії припою зі стислим при нагріванні газом 5. Для створення необхідного тиску до флюсу додають буру, що містить кристалізаційну воду.

Таблиця 2.35 – Склад зв'язувальної речовини припою

Номер	Зв'язувальна речовина
1	Розчин етилцелюлози № 3 – 9 мас. часток, розчин БМК-5 № 2 – 1 мас. частка, порошок припою – 60 мас. часток
2	Розчин ТБМ-60 № 4 – 10 мас. часток, порошок припою – 60 мас. часток

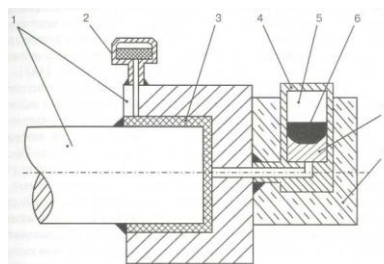


Рисунок 2.81 – Заготовки сталевих циліндрів компресорів, складених для автовакуумного паяння, (а) та схема складання деталей для автовакуумного паяння при широкому паяльному зазорі (б)

Теплоізоляція 8 забезпечує наявність розплавленого припою при охолодженні до завершення кристалізації металу шва. Затримку в живильнику припою до його повного розплавлювання і необхідного нагрівання вище від температури ліквідусу забезпечує клапан, що розплавляється, у каналі, який з'єднує живильник із зазором. Для цього з'єднувальний канал попередньо заправляють металом, що має більш високу (1,1–1,3 раза), ніж у припою, температуру плавлення. Гарантовану затримку за часом розплаву припою в живильнику забезпечує композиційний метал клапана, що складається з порошку, який не плавить-

ся, наповнювача і припою, що плавиться в контактi з розплавом, металу зв'язування. У деяких випадках, наприклад під час паяння титану, в пристрої клапана може бути використаний ефект контактного плавлення металів у вакуумі.

Наповнювач і припій вибирають відповідно до марки сталі, що паяється, і необхідних властивостей з'єднання. Розрахунок кількості наповнювача проводять з огляду на об'єм зазору V_3 , см^3 , коефіцієнт заповнення K_3 і густину наповнювача γ_n , $\text{г}/\text{см}^3$:

$$Q_n = V_3 K_3 \gamma_n.$$

Оскільки розрахунковий обсяг V_3 може відрізнитися від фактичного, доцільно при заповненні зазору наповнювачем визначати його фактичну масу.

Кількість припою Q_n визначається сумою:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4,$$

де Q_1 – маса припою в паяльному зазорі; Q_2 – маса технологічної добавки припою в живильнику, що перешкоджає переходу в зазор флюсу і газу; Q_3 – маса припою в з'єднувальних каналах; Q_4 – маса припою в порожнині сорбційного насоса.

Q_2 , Q_3 , Q_4 визначають виходячи з конкретних розмірів елементів вузла, що паяється. Q_1 визначають за формулою

$$Q_1 = Q_n \gamma_n (1 - K_3) / \rho_n,$$

де γ_n – густина припою; ρ_n – насипна маса наповнювача.

У живильник разом із припоєм поміщають флюс АНМ-10 із розрахунку 0,03 г на 1 г припою. Виходячи з розмірів вузла, що паяється, визначають необхідну довжину переміщення припою з живильника в зазорі за наповнювачем. За відомими температурою паянням T_n , розміром частинок наповнювача d і довжиною переміщення L за вищенаведеною методикою обчислюють потрібний тиск P та необхідну для цього добавку до флюсу бури $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$.

Конструкцію живильника вибирають у кожному конкретному випадку. Живильник доцільно виконувати циліндричним із мінімально можливим діаметром камери, тому що в цьому випадку технологічна добавка припою, яка залишається в живильнику, мінімальна. Розрахунок товщини стінки живильника виконують за формулою

$$s = dP/2[\sigma],$$

де s – товщина стінки, мм; d – внутрішній діаметр живильника, мм; P – тиск у живильнику, МПа; σ – допустиме напруження, МПа.

Сорбційний насос виготовляють у вигляді окремої камери з товщиною стінки 5–8 мм. Камеру насоса заповнюють сорбентом – порошком марганцю із частинками розміром 50–150 мкм. Залежно від вимог до з'єднання і складу матеріалу, що паяється, паяльний зазор може бути заповнений повітрям, киснем, а також може бути виконане вакуумування. При заповненні зазору повітрям або киснем кількість сорбенту визначають із розрахунку 0,04 г на 1 см^3 газу. Об'єм газу визначають розрахунком або за фактичною масою наповнювача в зазорі за формулою

$$Q_n = V_3 K_3 \gamma_n,$$

де V_3 – об'єм зазору; K_3 – коефіцієнт заповнення; γ_n – густина наповнювача.

Застосування автовакуумного паяння доцільне для великогабаритних деталей у тих випадках, коли виконання з'єднання зварюванням утруднене або неможливе. На рисунку 2.82 наведена схема паяної заготовки колінчастого вала. Особливістю цієї схеми є розміщення живильників у порожнинах шийок вала. Порожнисті шийки зменшують масу вала, що для великих валів є дуже істотним. У цьому випадку виявилось можливим поєднати конструкторські й технологічні вимоги. У процесі паяння в шийці вала перебуває припій, а після паяння залишається порожнина (рис. 2.83).

Паяні моделі колінчастого вала з діаметром шийки 100 мм випробовували на втомну міцність при знакозмінному циклічному навантаженні до повного руйнування. На рисунку 2.84 показаний злам шийки вала після випробувань. В'язкий злам відбувся на основному металі на відстані 3–4 мм від жолобника, виконаного по металу паяного шва.

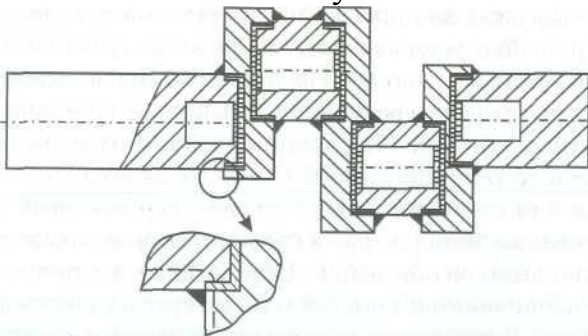


Рисунок 2.82 – Схема паяного колінчастого вала з порожнистими шийками

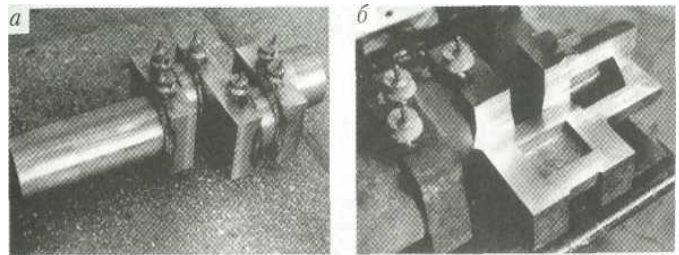


Рисунок 2.83 – Колінчастий вал із порожнистими шийками: а – перед автовакуумним паянням; б – розріз вала після паяння

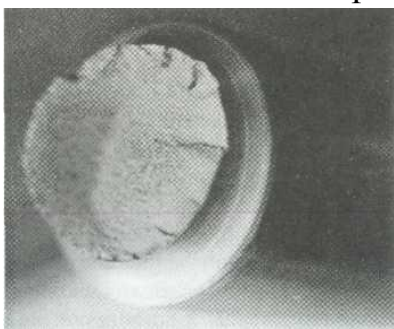


Рисунок 2.84 – Злам шийки паяного колінчастого вала після випробувань на втомну міцність

Заготовка чотириколінчастого вала виконана зі сталі 40 з порожнистими шийками. Діаметр шийки вала 200, довжина – 3 000 мм. Маса заготовки – 1 100 кг. Розмір припуску на механічне оброблення дорівнює 6–10 мм. Вал працює в опозитному поршневному компресорі 4М10-100/8 упродовж 15 років.

Більш технологічним є плакування деталей із просоченням наповнювача розплавом припою під дією капілярних сил при застосуванні керамічної або металевій форми для утворення широкого зазору. Прикладом застосування такого способу плакування є нанесення корозієстійкого зносостійкого покриття на ущільнювальні кільця кульових кранів, що працюють як запірні та регулювальні арматури за тиску до 20 МПа у компресорних установках.

2.3.2. Методи підвищення надійності та довговічності паяних робочих коліс відцентрових компресорних машин

2.3.2.1. Удосконалення конструкції й технології виготовлення коліс

Найбільшого застосування у відцентрових компресорах набули робочі колеса закритого типу, що являють собою конструкцію, до якої входять лопатки, основний і покривний диски (рис. 2.85). Колеса напіввідкритого типу без покривного диска застосовують переважно у компресорних стаціонарних установках. Закриті колеса можуть бути з однобічним і двобічним усмоктуванням газу. Лопатки коліс виготовляють окремо штампуванням або фрезерують у тілі одного з дисків.

Високі (до 300 м/с) колові швидкості коліс та вимоги аеродинаміки обумовлюють складність конструкції профілів деталей коліс. Були зафіксовані напруги на поверхні основних дисків різної конструкції діаметром 360 мм при частоті обертання 14 000 об/хв (рис. 2.86).

До статичних навантажень деталей колеса додаються динамічні, викликані аеродинамічним впливом газового потоку. Інтенсивного ерозійного руйнування зазнають лопатки коліс за наявності в стисненому газі абразивних частинок. Частинки, що переміщаються разом із газовим потоком при зміні його напрямку в горловині колеса з осьового на радіальне, руйнують або підрізають лопатки колеса. На рисунку 2.87 показана горловина колеса компресора.

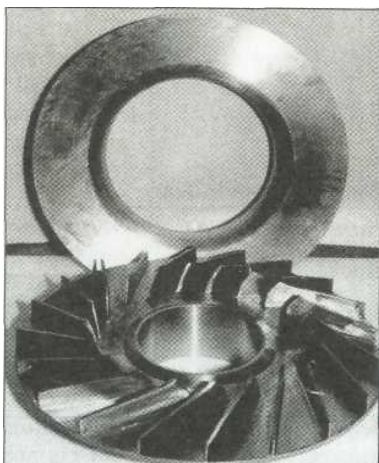


Рисунок 2.85 – Деталі закритого робочого колеса

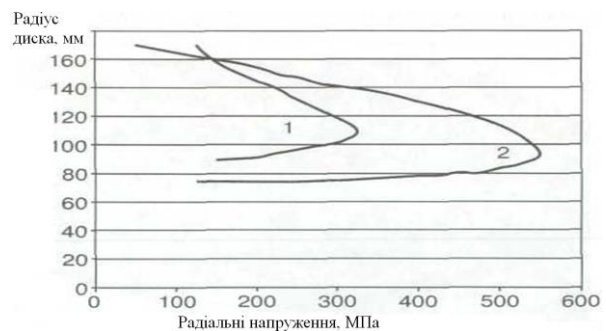


Рисунок 2.86 – Криві радіальних напруг в основному диску при частоті обертання 14 000 об/хв: 1 – паяного робочого колеса із фрезерованими лопатками; 2 – клепані колеса зі штампованими лопатками

Надійності роботи потужних ВКМ приділяють особливу увагу, тому що навіть короткочасне зупинення машини в умовах безперервного шахтного виробництва може завдати шкоди, що значно перевищує вартість компресора. Для забезпечення надійності при вібраційному навантаженні колеса виготовляють із міцних низьколегованих, високоміцних високолегованих сталей і титанових сплавів. Основні характеристики застосовуваних для виготовлення

колес матеріалів наведені в табл. 2.36–2.39.

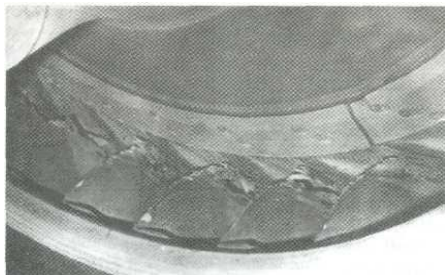


Рисунок 2.87 – Характер ерозійного руйнування лопаток робочого колеса компресора

Таблиця 2.36 – Хімічний склад сталей, застосовуваних для виготовлення робочих колес

Марка сталі	Вміст елементів, %																	
	C	Mn	Cr	Si	Ni	Mo	Nb	Сн	B	Al	S	P						
14Х2ГМРБ	0,1–0,16	0,9–1,2	1,1–1,5	0,17–0,37	< 0,3	0,45–0,55	0,01–0,04	< 0,3	0,001–0,004	–	0,035	0,035						
13ХГМРБ	0,1–0,16	0,9–1,2	0,9–1,3			0,3–0,4	0,01–0,03						< 0,3	–	0,035	0,035		
40ХН2МА	0,37–0,44	0,5–0,8	0,6–0,9			1,25–1,65	0,15–0,25						–	< 0,3	–	–	0,025	0,025
34ХН1М	0,3–0,4	0,5–0,8	1,3–1,7			1,3–1,7	0,2–0,3						–	–	–	–	0,035	0,03
34ХН3М	0,3–0,4	0,5–0,8	0,7–1,1			2,75–3,75	0,25–0,4						–	–	–	–	0,035	0,03
09Х15Н9Ю	0,08–0,10	0,7–0,9	14,0–16,0	0,7–0,9	7,0–9,4	–	–	–	–	0,7–1,3	0,025	0,035						
07Х16Н6	0,06–0,07	0,4–0,6	15,5–16,5	0,3–0,5	6,0–7,4	–	–	–	–	–	0,01	0,01						

Таблиця 2.37 – Механічні властивості сталей, застосовуваних для виготовлення колес

Марка сталі	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Термічне оброблення
14Х2ГМРБ	840	790	14	52	124	Загартування за температури 930 °С, відпускання за температури 620 °С
13ХГМРБ	700	600	14	50	60	
40ХН2МА	1 000	850	12	55	100	Загартування за температури 850 °С, відпускання за температури 620 °С
34ХН1М	850	700	12	38	50	
	950	800	11	35	50	

Продовження таблиці 2.37

Марка сталі	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²	Термічне оброблення
09Х15Н9Ю	1 300	1 000	19	52	75	Нормалізація за температури 1 000 °С, оброблення холодом за температури – 50...–70 °С, старіння за температури 350–400 °С
07Х16Н6	1 300	1 100	23	56	160	Нормалізація за температури 1 000 °С, оброблення холодом за температури – 50...–70 °С, старіння за температури 400 °С

Таблиця 2.38 – Хімічний склад титанових сплавів, застосовуваних для виготовлення коліс

Марка сплаву	Вміст елементів, %					
	Al	Cr	Fe	Si	C	V
AT6	5,0–7,0	0,5–0,9	0,25–0,6	0,25–0,6	< 0,1	
BT6C	5,0–7,0					3,5–4,5

Таблиця 2.39 – Механічні властивості титанових сплавів, застосовуваних для виготовлення коліс

Марка сплаву	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження, %	Відносне звуження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²
AT6	900	800	10	25	40
BT6C	950	800	12	22	78

Для з'єднання лопаток із дисками колеса застосовують заклепування, зварювання й високотемпературне паяння. Основні різновиди таврового з'єднання лопаток із диском показані на рис. 2.88. У тавровому з'єднанні, виконаному високотемпературним капілярним паянням, жолобник формується під дією капілярних сил і має невеликий (менше 1 мм) радіус. Такий жолобник є концентратором напруг і за високого рівня вібраційного навантаження обумовлює зародження втомної тріщини в покривному диску. Для зниження рівня вібраційного навантаження видаляють частину полотна між лопатками на диску. Таку операцію називають «ромашкою» (рис. 2.89). «Ромашка» трохи знижує продуктивність колеса, однак попереджає його руйнування.

У сучасному компресорному виробництві високотемпературне паяння є основним технологічним процесом у ряді способів виготовлення закритих робочих коліс ВКМ. Для обґрунтованого вибору припою, термічного циклу паяння і термооброблення при виготовленні паяних робочих коліс необхідне проведення комплексу випробувань паяних з'єднань: на розтягування, удар, втомну міцність, а також розгінних випробувань дослідних зразків коліс. На рисунку 2.90 показані зразки для випробувань паяних з'єднань на розтягування та удар.

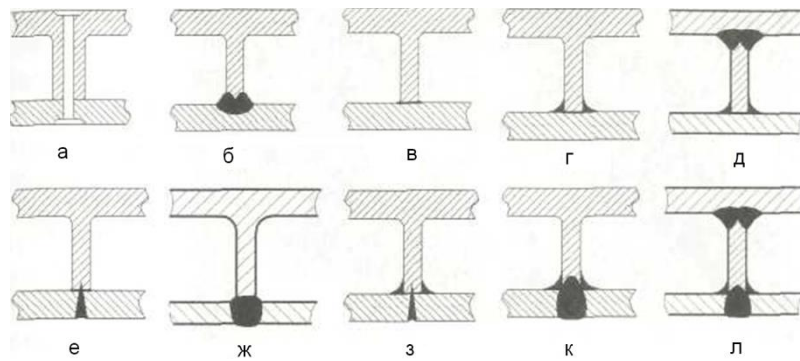


Рисунок 2.88 – Схема таврового з'єднання лопатки з диском:

а – заклепуванням; б – кутовими звареними швами; в – високотемпературним капілярним паянням; г – високотемпературним паянням із формуванням великого жолобника; д – приварюванням кутовими швами лопатки до основного диска і високотемпературним паянням із формуванням великого жолобника до покривного диска; е – електронно-променевим зварюванням і високотемпературним капілярним паянням; ж – дуговим зварюванням через паз у диску; з – електронно-променевим зварюванням і високотемпературним паянням із формуванням великого жолобника; к – дуговим зварюванням через паз у диску та високотемпературним паянням із формуванням великого жолобника; л – приварюванням кутовими швами лопатки до основного диска та високотемпературним паянням із формуванням великого жолобника до покривного диска, зокрема електрозаклепками або короткими звареними швами через паз



Рисунок 2.89 – Робоче колесо з «ромашкою» на дисках

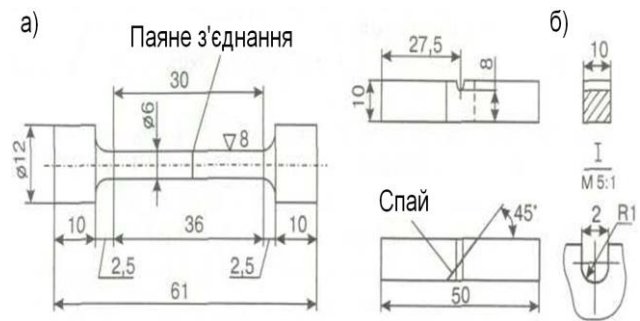


Рисунок 2.90 – Зразки для механічних випробувань паяних з'єднань: а – на розтягування; б – на удар

Для випробувань на удар краще застосовувати косостиковий зразок, що забезпечує менше розкидання показань порівняно зі зразком із розміщенням надрізу на паяному шві. При цьому в комплексі усіх видів випробувань випробування на удар є найбільш чутливим до зміни властивостей з'єднання. Під час дослідження впливу основних факторів паяння: температури T_n , тривалості витримки при паянні t , розміру паяльного зазору h , розрідження в камері вакуумної печі p , установили, що найбільшою мірою змінюється ударна в'язкість з'єднання (табл. 2.40). Оцінювали результати дослідів за величиною S , що визначається з рівняння

$$S = (P_{y \max} - P_{y \min}) / P_{y \text{ср}} ,$$

де $P_{у\max}$, $P_{у\min}$ і $P_{у\text{сер}}$ – відповідно максимальне, мінімальне і середньоарифметичне значення характеристик механічних властивостей з'єднань для всіх дослідів. Найбільшу чутливість до зміни режиму паяння має ударна в'язкість з'єднання. Цю характеристику доцільно використовувати як основну при попередньому оцінюванні матеріалів та режимів паяння.

Таблиця 2.40 – Вплив режиму паяння сталі 07X16H6 припоєм ПЖК-1000 на механічні властивості паяного з'єднання

Параметр режиму паяння				Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Межа утомної міцності, МПа	Ударна в'язкість, Дж/см ²
$T_n, ^\circ\text{C}$	t , хв	h , мм	p , Па				
1 280	10	0,1	0,1	1 140	890	280	71
1 240	20	0,25	1,3	1 050	760	350	86
1 320	0,1	0,25	1,3	1 130	880	330	72
1 240	0,1	0,25	0,01	1 010	830	310	88
1 320	20	0,05	0,1	1 180	860	300	30
1 240	од	0,05	0,1	1 190	880	320	53
1 320	0,1	0,05	0,01	1 130	870	360	35
Чутливість S				0,16	0,15	0,25	0,93

Для визначення придатності паяного з'єднання робочого колеса, що працює в умовах вібраційного навантаження, необхідною є утомна міцність. На рисунку 2.91 а показаний зразок для випробування при консольному навантаженні з обертанням. На рисунку 2.91 б показаний зразок для випробувань при осьовому циклічному навантаженні, симетричному або асиметричному. Надріз на паяному шві нівелює зміни утомної міцності з'єднання залежно від факторів його утворення. На рисунку 2.92 показаний паяний зразок із тавровим з'єднанням для випробувань на розтягання або утомну міцність при консольному циклічному навантаженні.

Поряд із випробуванням зразків на завершальному етапі розроблення нової конструкції і технології виготовлення робочого колеса проводять статичні й динамічні випробування дослідних зразків коліс. На рисунку 2.93 показана схема випробування робочого колеса при осьовому статичному або динамічному навантаженні. Для випробування зразків коліс необхідна потужна іспитова гідравлічна машина з пульсатором зусиллям 100 т при статичному і 50 т – при циклічному навантаженнях. Такі можливості має машина МУП-100. На рисунку 2.94 показаний основний диск паяного колеса зі сталі 34ХН1М після випробувань при осьовому навантаженні. Руйнування колеса відбулося в основному щодо металу лопаток. На рисунку 2.95 показана макроструктура паяного шва на покривному диску зруйнованого колеса.

Дослідження уламків деталей, зруйнованих при розгінних випробуваннях коліс, дозволяє оцінити міцність та пластичність паяних з'єднань. На рисунку 2.96 показані зруйновані при розгінних випробуваннях колеса зі сталі 34ХН1М, паяні припоями систем Pd-Ni-Cr і Pd-Ni-Fe.

Технологічний процес виготовлення паяних робочих коліс складається з таких основних етапів: виготовлення деталей із технологічними припусками для паяння, підготовки деталей до паяння, паяння, термічної обробки паяного колеса і остаточної обробки. Паяння коліс виконують при нагріванні у вакуумних печах і автовакуумному нагріванні. Термічну обробку паяних коліс при автовакуумному нагріванні виконують у звичайних електричних нагрівальних печах.

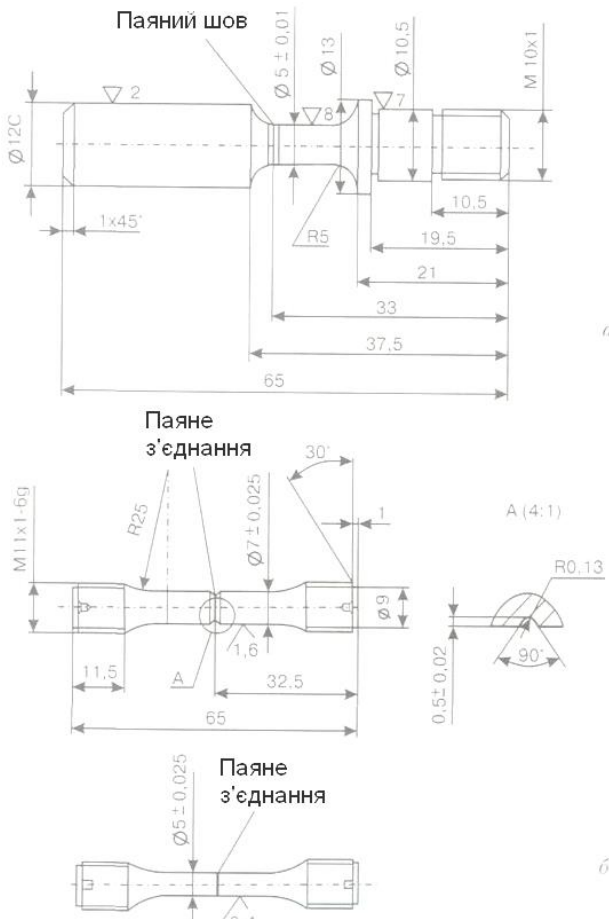


Рисунок 2.91 – Зразки для випробувань паяних з'єднань на утомну міцність: а – при консольному навантаженні з обертанням; б – при осьовому циклічному навантаженні

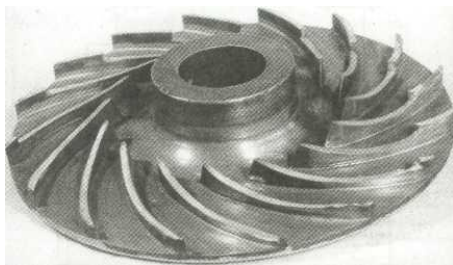


Рисунок 2.94 – Основний диск паяного колеса зі сталі 34ХН1М після статичних випробувань при осьовому навантаженні

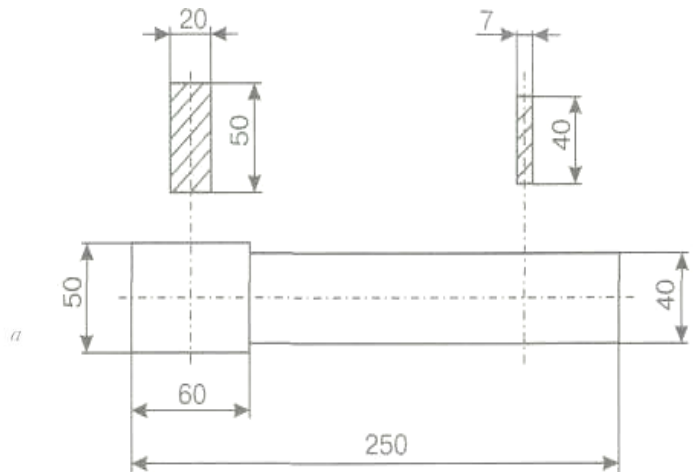


Рисунок 2.92 – Зразок для випробувань таврового паяного з'єднання на розтягання або утомну міцність при консольному циклічному навантаженні

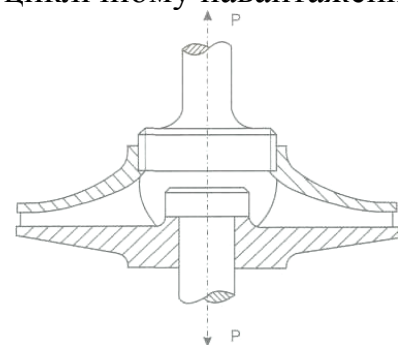


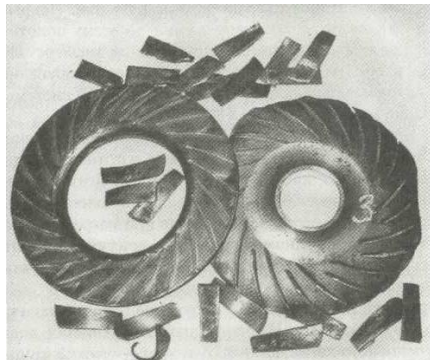
Рисунок 2.93 – Схема випробування паяного колеса при осьовому статичному або циклічному навантаженні



Рисунок 2.95 – Макроструктура зламу паяного шва на покривному диску зруйнованого колеса

Штамповані з листа лопатки збирають у пристрої на основному диску і закріплюють їх за допомогою захоплень аргонодуговим зварюванням (рис. 2.97). У припаяних лопатках видаляють технологічні припуски і обробляють поверхню, що з'єднується, по профілю покривного диска (рис. 2.98).

а



б

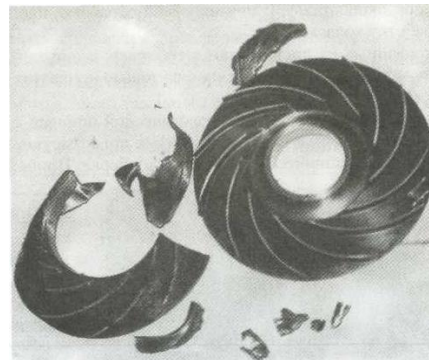


Рисунок 2.96 – Характер руйнування при розгінних випробуваннях робочих коліс зі сталі 34ХН1М, паяних припоями: а – системи Pd-Ni-Cr; б – системи Pd-Ni-Fe

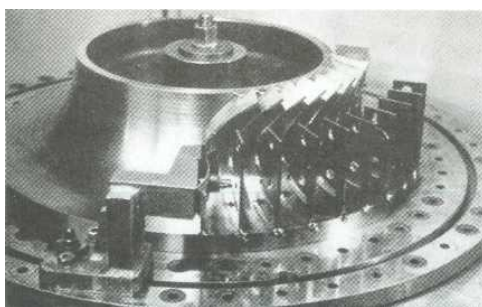


Рисунок 2.97 – Штамповані лопатки на основному диску робочого колеса

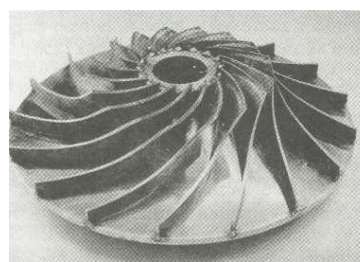


Рисунок 2.98 – Основний диск із припаяними просторовими лопатками перед паянням із покривним диском

Розрахунок кількості припою, необхідного для формування паяного шва із жолобниками, виконують за формулою, виведеною на підставі експериментальних даних:

$$Q = K_1 N(L+1,5)(S+0,8)\gamma_n \delta + K_2 NLS\gamma_n \delta,$$

де Q – маса припою для паяння одного колеса, г; $K_1 = 1,05$ – коефіцієнт використання припою; K_2 – коефіцієнт, що залежить від зовнішнього діаметра колеса (при $D_2 < 300$ $K_2 = 0$, при $D_2 > 300$ $K_2 = 0,8$); N – кількість лопаток у колесі; L – розгорнута довжина лопатки, см; S – товщина лопатки, см; δ – товщина фольги припою, см; γ_n – щільність припою, г/см³.

Для паяння коліс, диски яких деформуються зі значним збільшенням розмірів паяльних зазорів, необхідне тверде кріплення дисків. Для цього в центрувальному пристрої диски стискають до зменшення зазорів і зовні на них установлюють і приварюють у секторах між лопатками бандажні стяжки. Якщо конструкція колеса не дозволяє виконати захоплення лопатки у горловині, пе-

редбачають кільцевий технологічний припуск на маточині колеса для твердого кріплення дисків (рис. 2.99).

Високотемпературне нагрівання при паянні змінює структуру металу, приводить до росту зерна і знижує його механічні властивості. Для відновлення механічних властивостей металу колеса після паяння виконують термічне оброблення. Залежно від матеріалу колеса це можуть бути аустенізація, нормалізація, загартування, відпускання, оброблення холодом, старіння. Операції термообробки виконують при нагріванні у звичайних нагрівальних печах. Для запобігання окиснюванню поверхонь робочих каналів колеса й паяних швів застосовують автовакуумне нагрівання. Порожнину колеса герметизують приварюванням бандажа і заглушок на горловині й маточині (рис. 2.100).

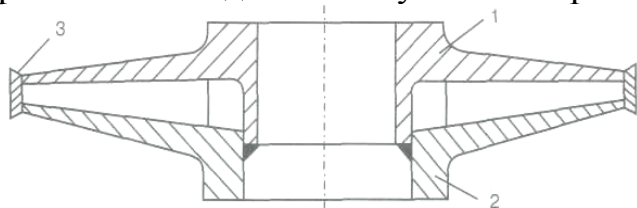


Рисунок 2.99 – Схема твердого кріплення дисків колеса зварюванням: 1 – основний диск; 2 – зварений шов у маточині; 3 – бандажні стяжки

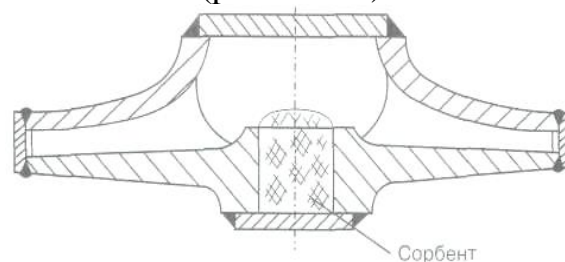


Рисунок 2.100 – Схема підготовки робочого колеса до термообробки при автовакуумному нагріванні

У колесі після термообробки видаляють бандаж і здійснюють 100 % контроль паяних швів. За відсутності дефектів виконують остаточну механічну обробку колеса, балансують і піддають розгінним випробуванням із перевищенням частоти обертання на 10–15 % від робочої. Після розгінних випробувань виконують контроль за допомогою кольорової дефектоскопії зовнішніх поверхонь дисків.

2.3.2.2. Закономірності зміни надійності роботи паяного колеса шахтного відцентрового компресора при використанні таврового паяного з'єднання

Паяні робочі колеса, процес паяння яких пройшов тривалу промислову перевірку, експлуатують у компресорах при радіусі жолобника паяного з'єднання, що не перевищує 0,5 мм. Для забезпечення працездатності таких коліс видаляють частину полотна диска («ромашка»). При цьому величина концентратора напруг для лопатки товщиною 7 мм, як впливає із зазначеного вище розрахунку, становить 3,07. Випробуванням паяного тавра зі сталі 07X16H6 із товщиною стінки 7 мм і радіусом жолобника 0,5 мм визначили, що конструкційна утомна міцність становить 185 МПа. Для збільшення утомної міцності вдвічі, що досягає рівня основного металу, необхідно зменшити коефіцієнт концентрації K удвічі, тобто $3,07 : 2 = 1,53$. Із формули впливає, що для цього необхідний жолобник $R = 5,1$ мм. У табл. 2.41 і на рис. 2.101 наведені результати розрахунку розміру радіуса для лопаток товщиною 4–10 мм, що включає

весь можливий діапазон розмірів паяних коліс. Наведені дані свідчать про те, що для підвищення конструкційної утомної міцності паяних коліс до рівня основного металу необхідно збільшити розмір радіуса жолобника паяного шва до 5 мм.

Одержати в паяному з'єднанні такий великий жолобник можна, попередньо сформувавши його з металевого порошку. Для цього в куті з'єднання з одного або обох боків тавра при збиранні формують із пасти жолобник із необхідними за умовами рівномірності формою і розмірами (рис. 2.101).

Таблиця 2.41 – Значення коефіцієнта концентрації напруг і радіусів жолобника тавра

Товщина лопатки, мм	4	5	6	7	8	9	10
Коефіцієнт концентрації K для паяного тавра з $R = 0,5$ мм	2,55	2,74	2,91	3,07	3,23	3,36	3,5
Припустимий коефіцієнт концентрації $K_{прип}$ ($K/2$)	1,27	1,37	1,46	1,53	1,62	1,68	1,75
Необхідний радіус тавра R , мм	4,4	4,6	4,7	5,1	5,2	5,4	5,5

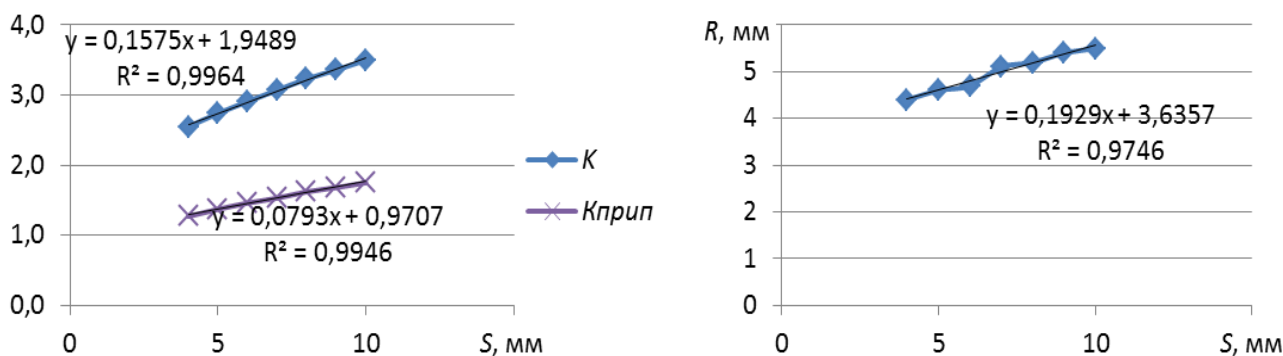


Рисунок 2.101 – Залежність коефіцієнта концентрації напруг, припустимого коефіцієнта концентрації (а) і необхідного радіуса тавра (б) від товщини лопатки

Установлено закономірності зміни характеристики концентрації напруг таврового паяного з'єднання лопатки з диском робочого колеса відцентрового компресора – коефіцієнта напруг від величини внутрішнього напруження, радіуса жолобника і товщини лопатки. Надійність роботи паяного колеса шахтного відцентрового компресора визначається теоретичним коефіцієнтом напруг, що дорівнює відношенню величини внутрішнього напруження в якій-небудь точці за наявності концентратора до напруги в тій самій точці за відсутності концентратора напруги. Для досягнення мінімального значення концентратора напруги необхідне збільшення плавності переходу радіуса жолобника, оптимальне значення якого дорівнює подвійній величині товщини стінки тавра; при цьому при збільшенні товщини лопатки колеса з 4 до 10 мм коефіцієнт концентрації лінійно зростає з 2,55 до 3,5, а необхідний радіус тавра змінюється з 4,4 до 5,5 мм.

2.3.2.3. Дослідження формування комбінованого таврового з'єднання, виконаного паянням і зварюванням плавленням

Формування якісного паяного таврового з'єднання з великим жолобником можливе, якщо при нагріванні до температури паяння не відбувається зсуву деталей тавра.

Певні переваги має електронно-променеве зварювання через тіло полиці. При зварюванні немає необхідності проплавлення стінки тавра по всій товщині, з одного боку, через небезпеку пропалювання, з іншого – паяне таврове з'єднання з жолобником необхідного радіуса забезпечує рівномірність із основним металом і без звареного з'єднання. Тому достатнім є проварювання стінки в межах 0,3–0,6 від її товщини. Технологічним є проварювання завширшки 30 % від товщини стінки, оскільки в цьому випадку поряд із можливістю формування якісного з'єднання з'являється можливість істотно знизити вимоги до точності траєкторії осі шва уздовж стінки. При проварюванні 50 % і відхиленні осі шва на $0,1 S$ (S – товщина стінки) можливе пропалювання, яке потім важко усунути. При проварюванні 30 % допускається відхилення осі шва від осі стінки на $0,3 S$, напливи або деформації стінки в куті тавра, що утворюються при цьому, не приводять до браку виробу (рис. 2.102). У деформованому куті тавра формують жолобник необхідної форми, що усуває небезпеку непоправного браку.

Особливий інтерес становить зазор між стінкою і полицею, що фіксується зварюванням, оскільки практично завжди він неминуче буде наявним у з'єднанні та істотно впливатиме на його якість. Результати металографічних досліджень таврових з'єднань, виконаних електронно-променевим зварюванням, показали, що при контакті шліфованих поверхонь у зоні термічного впливу звареного шва шляхом дифузії утвориться з'єднання, обумовлене дією високої температури й усадки при кристалізації металу шва (рис. 2.103). При зварюванні деталей із шорсткуватою поверхнею в з'єднанні утвориться зазор. Вплив зазору на формування структури з'єднання показаний на рис. 2.102. При розробленні технології необхідно передбачити умови, за яких у тавровому з'єднанні після зварювання утвориться зазор розміром $> 0,1$ або $< 0,2$ мм.

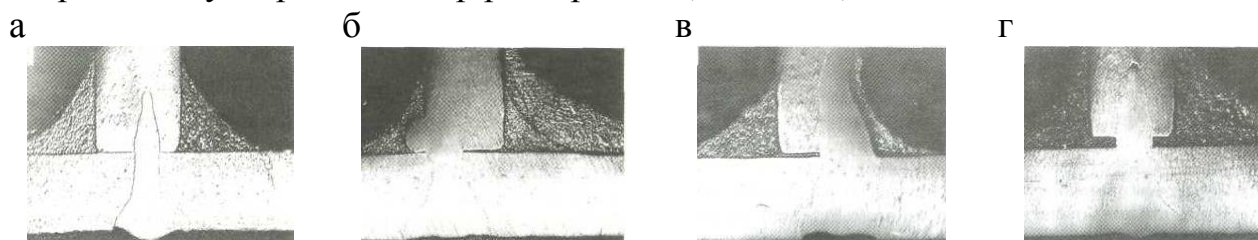


Рисунок 2.102 – Мікроструктура паяно-зварного таврового з'єднання при зазорі між стінкою і полицею: а – 0,03; б – 0,1; в – 0,2; г – 0,4 мм (зсув осі шва від осі стінки при електронно-променевому зварюванні: а) $0,1 S$; б) $0,3 S$; в) $0,2 S$ з шириною проварювання 30 % S (x 10)

Поряд з електронно-променевим зварюванням для фіксування деталей тавра перед формуванням великого жолобника застосовують аргонодугове зварювання через паз у покривному диску (рис. 2.104). Для виконання зварювання

в диску виконують наскрізний паз довжиною $0,4-0,6$ мм від довжини лопатки (рис. 2.105). Паз може бути вузьким. При контакті з поверхнею лопатки ширина паза становить $0,3 S$. Кут оброблення паза виконують таким, щоб забезпечити якісне зварювання. При такому виконанні з'єднання в кутах тавра неминуче залишаються непроварені ділянки (рис. 2.106). При зварюванні вони перебувають у зоні термічного впливу дуги, і поверхні окиснюються. При виготовленні коліс із низьколегованих сталей окиснені поверхні при нагріванні у вакуумі відновлюються вуглецем основного металу, у результаті чого в куті тавра формується зазор із капілярною поверхнею. При паянні розплав припою переміщується під дією капілярних сил у зазор і формує паяне з'єднання в цих ділянках.

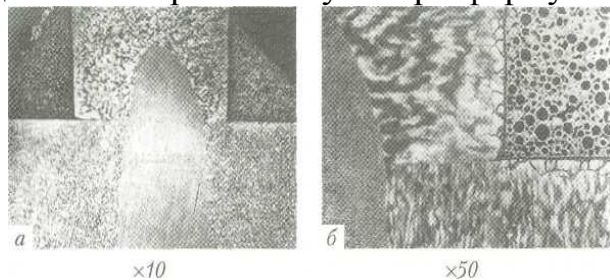


Рисунок 2.103 – Мікроструктура паяно-зварного таврового з'єднання шліфованих деталей

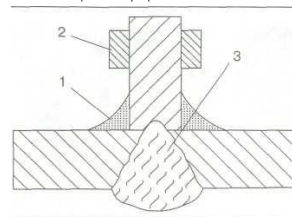


Рисунок 2.104 – Схема паяно-зварного таврового з'єднання:
1 – жолобник паяного шва;
2 – припій; 3 – зварний шов

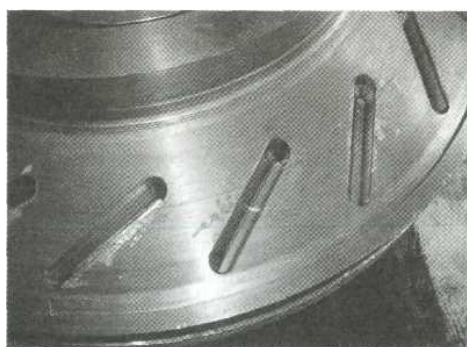


Рисунок 2.105 – Пази в покривному диску для приварювання лопаток

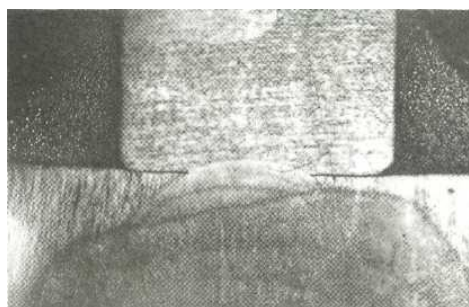


Рисунок 2.106 – Макрошліф паяно-зварного з'єднання з великим жолобником і пазом шириною $0,3 S$ (x 10)

При виготовленні коліс із високолегованих сталей така методика формування таврового з'єднання непридатна. Окиснений при зварюванні метал у зоні термічного впливу може залишитися в зазорі при нагріванні до температури паяння. У цьому випадку в таврі утворюються непропаяні ділянки. Для формування бездефектного з'єднання паз виконують розміром $0,7-0,8 S$ і зварювання здійснюють таким чином, щоб кути тавра були повністю проварені. Невеликі напливи і деформацію стінки при формуванні жолобника покривають пастою (рис. 2.107).

На лопатці формуються два види таврового з'єднання – паяно-зварне на ділянці паза і паяне на іншій ділянці. Для виконання паяного з'єднання тавра при збиранні колеса на поверхню лопатки наносять пасту з порошку наповнювача. При такій підготовці паяне з'єднання утвориться на всьому перерізі тавра,

зокрема й у зазорі між стінкою і полицею (рис. 2.108). За наявності на лопатці двох різних видів з'єднання припій розміщують із двох боків тавра на ділянках, де зварений шов з'єднує стінку й полицю.



Рисунок 2.107 – Макрошліф паяно-зварного з'єднання з великим жолобником і пазом шириною $0,8 S$ (x 10)

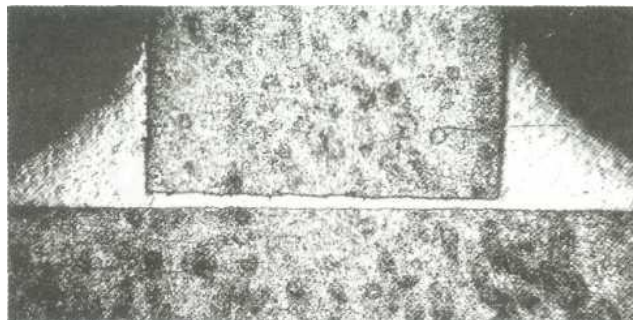


Рисунок 2.108 – Макрошліф паяного тавра з великими жолобниками (x 10)

2.3.2.4. Технологія автовакуумного паяння закритих робочих коліс

Застосування дугового зварювання для закріплення дисків перед паянням за допомогою приварювання бандажа на зовнішньому діаметрі колеса і для твердого з'єднання лопаток через пази в диску створює передумови для перетворення колеса в автономний контейнер і виконання автовакуумного паяння у звичайній нагрівальній печі (рис. 2.109).

Карбонільне залізо в паяному зазорі між лопаткою і диском утворює прошарок із дрібнодисперсних частинок розміром 3–5 мікронів із мікрокапілярною системою. Припій із жолобника, сформованого частинками наповнювача розміром 50–100 мкм, переміщається в прошарок і формує з'єднання як у зазорі, так і в жолобнику (рис. 2.110).

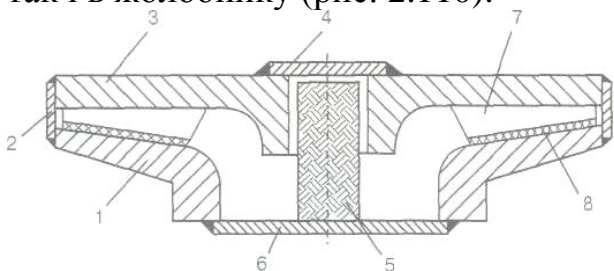


Рисунок 2.109 – Схема автовакуумного паяння робочого колеса:

1 – покривний диск; 2 – бандаж; 3 – основний диск; 4–6 – технологічні заглушки; 5 – патрон із сорбентом та активатором; 7 – лопатка; 8 – паяний шов

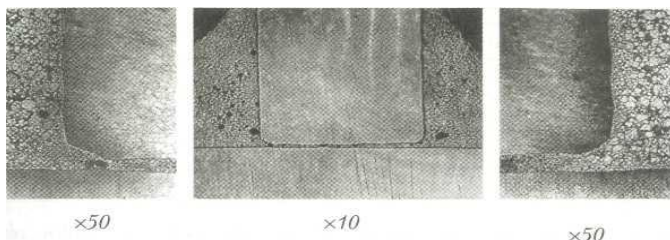


Рисунок 2.110 – Мікроструктура таврово-паяного з'єднання із нанесеним у зазор і кути тавра дрібнодисперсним порошком карбонільного заліза

Відомо, що нагрівання в парах, що містить галоїди, дозволяє виконувати паяння легованих сталей за рахунок флюсувальної дії галоїдних з'єднань. За окиснювальною здатністю більш активними від кисню є хлор і фтор. Суміш, що складається з порошків активних сорбентів Mn і Sr із галоїдовмісною сіллю, створює при нагріванні

активне середовище, необхідне для паяння сталі з окисненою поверхнею. Для створення галоїдовмісної атмосфери необхідно застосовувати галоїдні з'єднання, які легко випаровуються, переходять із твердого стану в газоподібний або розкладаються при невисокій температурі. Відомості про деякі придатні для паяння галоїдні з'єднання наведені в табл. 2.42.

Таблиця 2.42 – Властивості галоїдних з'єднань

Галоїдна сіль	NH ₄ Cl	LiCl	KBr	KF	NaF	AlF ₃	LiF	NH ₄ F
Температура перетворення, °С	337 сублімація	613 плав.	735 плав.	857 плав.	1040 плав.	1 040 розклад.	870 плав.	167 розклад.
Розчинність у 100 г води при 20 °С, г	29	83	53	96	4,3	0,5	0,2	74

Для дослідження впливу галогенідів на формування паяного з'єднання виконували паяння зразків зі сталі 07X16H6 у контейнері з нержавіючої сталі. Схема зразка показана на рис. 2.111. Елементи тавра – стінку і полицю – з'єднували аргонодуговим зварюванням швом 1 з однорідною щодо основного металу присадкою. Після зварювання на зразку утворювалися окиснені поверхні 2 на зварному шві, у його зоні – і у кутах тавра. З одного боку тавра формували жолобник 3 із залізонікелевого сплаву H24 (пермалой). Для формування жолобника застосовували пасту з порошку H24 і 5 % розчину в розчиннику P5 акрилової смоли БМК-5. Після видалення при нагріванні розчинника на затверділий порошок H24 наносили порошок припій ВПр2 системи Cu-Mn-Ni-4 у вигляді пасти зі зв'язувальною речовиною, аналогічною пасті для порошку жолобника. Розчинник видаляли, нагріваючи в електричній печі при температурі 200 °С. На частину окисненої поверхні, у куті тавра, наносили шар карбонільного заліза, що містить 0,78 % С.

Для дослідження стану припою при плавленні на поверхні сталі 07X16H6 розміщали відрізок стрічки 5 припою ВПр2. Припій ВПр2 має інтервал плавлення, що дорівнює 20 °С. При розміщенні порошкового припою на порошку жолобника капілярні сили можуть видаляти легкоплавку частину, залишаючи на поверхні тугоплавку частину припою. Для аналізу цього процесу поряд зі зразком тавра в контейнер поміщали наважку порошку припою ВПр2 у металевій виливниці.

Перед герметизацією в контейнер поміщали виливницю із сумішшю сорбенту і галогеніду в кількості з розрахунку 0,04 г/см³ від об'єму контейнера. Контейнер герметизували зварюванням і нагрівали в електричній печі до температури 1 000 °С із витримкою 30 хв. Після охолодження контейнер розкривали й аналізували стан його вмісту. Результати наведені в табл. 2.43.

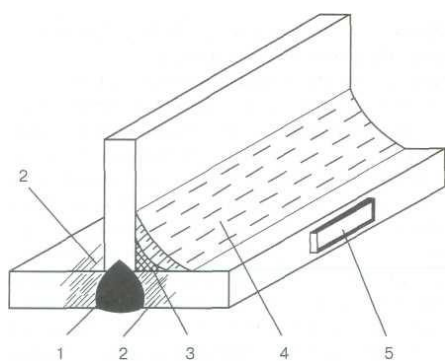


Рисунок 2.111 – Схема паяного таврового зразка: 1 – зварний шов; 2 – окиснена поверхня; 3 – жолобник із металевого порошку; 4 – порошковий припій ВПр2; 5 – стрічка припою ВПр2

Таблиця 2.43 – Стан припою ВПр2 і окиснена поверхня сталі після автовакуумного нагрівання з галогенідом

Сорбент, галогенід	Стан поверхні порошку Н24, просочування припоєм ВПр-2	Стан порошку припою ВПр-2	Стан стрічки припою ВПр2 на сталі 07Х16Н6	Стан порошку припою ВПр2 на сталі 12Х18Н10Т	Стан оксидної плівки сталі 07Х16Н6
Mn, NH ₄ Cl	Шлак чорний, відділяється	Розплавлений, чорні шлаки	Розплавлений частково, шлаки	Розплавлений частково, шлаки	Не відновлена, сіра
Mn, LiCl	Шлак зелений, відділяється	Розплавлений частково, зелені шлаки			Не відновлена, сіро-зелена
Mn, KBr	Шлак білий, відділяється				Відновлена під шаром шлаків
Mn, KF	Емаль біла, не відділяється	Розплавлений частково, біла емаль			Відновлена під шаром емалі
Mn, LiF	Шлак чорний, не відділяється	Розплавлений, чорні шлаки			Відновлена під шаром шлаків
Mn, NaF	Емаль біла, не відділяється	Розплавлений, біла емаль			Розплавлений частково, емаль
Mn, AlF ₃ Mn, NH ₄ F	Емаль біла, відділяється	Розплавлений, білі шлаки	Розплавлений частково, шлаки	Розтікся під плівкою шлаків	Відновлена під шаром шлаків

Як бачимо з табл. 2.43, автовакуумне нагрівання з галогенідами при паянні окиснених поверхонь не забезпечує формування якісного з'єднання через утворення шлаків.

Були проведені експерименти із застосуванням мінімально розчинних у воді галогенідів та різних сорбентів при випереджальному нагріванні об'єму до температури 200 °С. Результати наведені в табл. 2.44. Як бачимо, очищення окисненої поверхні та якісне формування паяного з'єднання досягаються із застосуванням сорбентів Ti, Mn і фторидів LiF, NaF, AlF₃.

Таблиця 2.44 – Стан припою ВПр2 та окисненої поверхні сталі після автовакуумного нагрівання з галогенідом і попереднім нагріванням до 200 °С

Сорбент, галогенід	Стан поверхні порошку H24, просочення припоєм ВПр-2	Стан порошку припою ВПр-2	Стан стрічки припою ВПр2 на сталі 07X16H6	Стан порошку припою ВПр2 на сталі 12X18H10T	Стан окисдної плівки сталі 07X16H6
Mn, LiF	Окремі точки білої емалі	Розплавлений, чистий	Розплавлений, розтікся	Розтікся, точки білої емалі	Відновлений, металевий блиск
Mn, NaF				Розплавлений, розтікся	
Mn, AlF ₃	Окремі точки білих шлаків	Окремі точки білих шлаків			
Cr, LiF					
Ti, LiF	Чиста	Розплавлений, чистий			

За технологічними умовами розміри частинок порошку для формування жолобників повинні перебувати в межах 50–150 мкм. Метал шва, утворений просоченням порошку з такими частинками розплавом мідно-марганцевого припою, при короткочасній витримці при температурі паяння має низькі пластичні властивості. При тривалій ізотермічній витримці під час контакту частинок відбувається кристалізація рідкої фази, а в порожнинах між частинками рідкий припій подрібнює частинки порошку. При витримці 40–60 хв формується однорідний метал паяного шва, що складається з легованої мідно-марганцево-нікелевої матриці, армованої сфероїдальними частинками розміром 5–20 мкм, утвореними з порошку. Метал із такою однорідною рівноважною дрібнодисперсною структурою характеризують такі механічні властивості: $\sigma_T = 340$ МПа, $\sigma_B = 640$ МПа, $\delta = 30\%$, $\psi = 60\%$, КСУ = 120 Дж/см², твердість – 160 НВ. Такі властивості забезпечують тавровому з'єднанню в колесі рівномірність з основним металом при відповідному виборі розміру жолобника.

Технологія виготовлення робочих коліс із застосуванням автовакуумного нагрівання має деякі переваги порівняно із застосуванням нагрівання у вакуумній печі. Вона може бути реалізована при незначних капітальних витратах у серійному й одиничному виробництві при виготовленні, ремонті та модернізації відцентрових компресорів.

2.3.3. Методи підвищення надійності та довговічності теплообмінників шляхом застосування високотемпературного вакуумного паяння

2.3.3.1. Удосконалення конструкції й технології паяння пластинчасто-ребристих теплообмінників

Для паяння ПРТ застосовують шлікерні припої з дрібнодисперсних порошків Ni, Cr, Cu, Fe, Si, B, що забезпечують формування одночасно з паянням захисного корозійостійкого покриття.

Збирання підготовлених для паяння знежирених деталей ПРЕ виконують у стапелях, що забезпечують точне взаємне розміщення деталей. У стапель укладають технологічну товстостінну плиту, на ній розміщують перший бічний лист, а потім по черзі насадку холодного каналу, пластини робочого каналу, насадку гарячого каналу, бруски. Між двома суміжними шарами деталей розміщують фольгу припою. Завершується набір пакета ПРЕ установкою другого бічного листа і технологічної плити з товстого сталевго листа. Пакет між технологічними плитами фіксують гвинтовими стяжками, звільняють від стапеля і поміщають між плитами преса із пневматичним приводом (рис. 2.112).

При паянні алюмінієвих ПРЕ пакет деталей ПРЕ із плитами і стяжками передають для паяння у вакуумній печі (рис. 2.113). Після паяння ПРЕ звільняють від оснащення і передають на збирання чергового ПРЕ. Сталеве оснащення для паяння алюмінієвих ПРЕ застосовують багаторазово. Після 150–180 циклів заміняють гвинтові стяжки і за необхідності рихтують технологічні плити за допомогою гідравлічного преса.

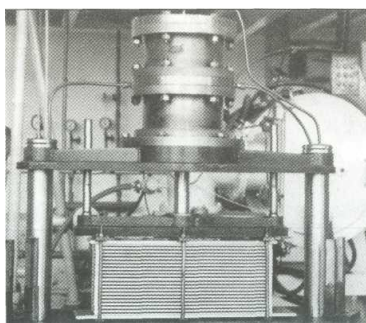


Рисунок 2.112 – Прес для складання пакета деталей ПРЕ

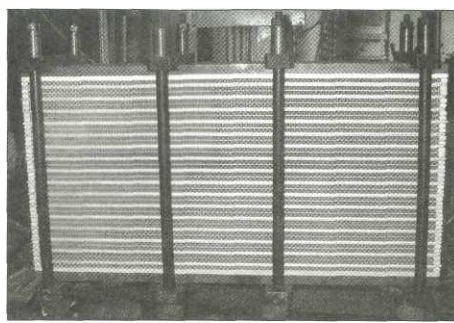


Рисунок 2.113 – Пакет деталей ПРЕ, зібраний для паяння

При виготовленні сталевих ПРЕ складальне оснащення не придатне під час паяння, оскільки при високій температурі деталі оснащення деформуються і втрачають міцність. Деталі сталевго ПРЕ, стиснені в складальному пристрої, фіксують за допомогою аргонодугового зварювання. При цьому застосовують два варіанти фіксування. У першому варіанті технологічні плити, розміщені на пакеті деталей ПРЕ, закріплюють приварюванням технологічних брусків до бічних поверхонь плит або до бічних листів (рис. 2.114). Так збирають ПРЕ зі штампованими пластинами із вбудованими і штампованими колекторами.

За наявності в складі ПРЕ брусків у гарячих каналах взаємне розміщення деталей фіксують приварюванням пластин на перетині брусків. Пластини й бічні листи утворюють у паяному ПРЕ колекторну камеру. Положення брусків у гарячих каналах також фіксують приварюванням технологічних брусків, розміщених між бічними листами на поверхні ПРЕ (рис. 2.115). Бруски з перетином 3 x 5 мм розміщені на відстані 120–150 мм.

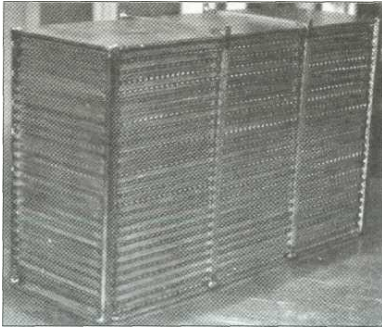


Рисунок 2.114 – Сталевий ПРЕ, підготовлений до паяння

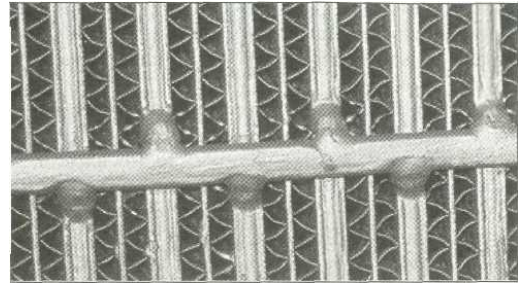


Рисунок 2.115 – Технологічні бруски для фіксування зварюванням взаємного розміщення деталей ПРЕ перед паянням

Після виконання всіх зварних з'єднань пакет ПРЕ звільняють від складального оснащення і спрямовують для паяння у вакуумній печі. Після паяння ПРЕ піддають випробуванням на герметичність стисненим повітрям.

2.3.3.2. Закономірності зміни довговічності тонкостінного теплообмінника шахтних компресорних установок при високотемпературному паянні

Високотемпературне паяння тонкостінних конструкцій, таких як ПРТ, має свої особливості, пов'язані в першу чергу з ерозією розплавом припою тонкої стрічки, із проникненням розплаву міді по межах зерен сталі, із втратою міцності металу при його змочуванні розплавом. Перелічені явища поодиночі, а тим більше разом можуть призвести до утворення макро- та мікродефектів, виправлення яких утруднено, а в ряді випадків неможливо.

Зразки для випробувань на розтягання й ударну в'язкість виготовляли із прутка діаметром 40 мм. Зразки піддавали термічній обробці за такими режимами: нагрівання до температури 1 120 °С, витримка 15 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 20 °С; нагрівання до температури 1 120 °С, витримка 15 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 20 °С, нагрівання до температури 700 °С, витримка 60 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 20 °С; нагрівання до температури 1 120 °С, витримка 15 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 20 °С; нагрівання в електричній муфельній печі до температури 700 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі. Результати механічних випробувань – наведені в табл. 2.45.

Механічні властивості стрічки після термічної обробки за режимом: нагрівання до температури 1 120 °С, витримка 15 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 100 °С; нагрівання до температури 700 °С, витримка 60 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 20 °С наведені в табл. 2.46. Механічні властивості стрічки після термічної обробки за режимом: нагрівання до температури 1 120 °С, витримка 15 хв, охолодження у вакуумній печі до температури 100 °С; нагрівання в електричній муфельній печі до температури 700 °С, витримка 60 хв, охолодження на повітрі – наведені в табл. 2.47.

Таблиця 2.45 – Механічні властивості сталі 20X13 у вихідному стані та після термообробки

Параметр	Вихідний стан	Режим термообробки		
		1	2	3
Межа міцності, МПа	510	1 620	670–720	730–740
Межа текучості, МПа	230	1 470	370–420	530–540
Відносне подовження, %	37	4	26	23
Відносне звуження, %	75	8	55	66
Ударна в'язкість, Дж/см ²	190	8	57	83–100
Твердість	164 НВ	50HRC	195 НВ	224 НВ

Таблиця 2.46 – Механічні властивості стрічки зі сталі 20X13 після нагрівання й відпуску у вакуумі

Товщина, мм	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
0,14	590	750	7
0,42	510	750	8,8
0,8	570	810	15,8

Таблиця 2.47 – Механічні властивості стрічки зі сталі 20X13 після нагрівання при відпуску на повітрі

Товщина, мм	Межа текучості, МПа	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
0,14	540	720	8
0,41	520	740	13
0,82	550	780	13,4

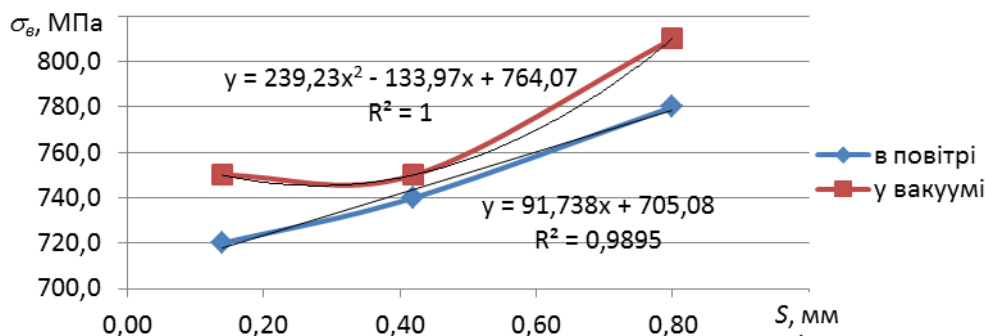


Рисунок 2.116 – Залежність зміни межі міцності від товщини стрічки при нагріванні та охолодженні у вакуумній печі й на повітрі

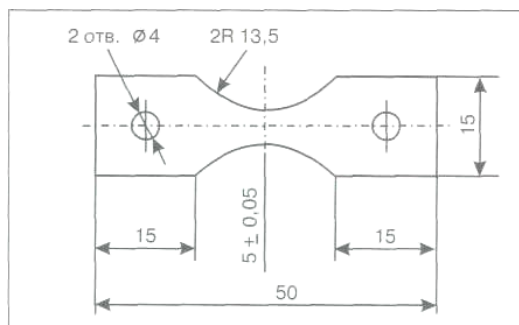
Установлено закономірність зміни довговічності, що характеризується межею міцності сталі тонкостінного теплообмінника шахтних компресорних установок при високотемпературному паянні після нагрівання і відпуску у вакуумі, від товщини стрічки теплообмінника. У робочих (гарячих) каналах ПРТ із металевої стрічки, у яких переміщається теплоносій із низькою теплопровідністю, насадка із гладкою поверхнею знижує ефективність теплообміну, а розсічення ламінарного контактного шару в робочих (гарячих) каналах ПРТ дозволяє активно інтенсифікувати теплообмін, створюючи турбулентний потік в'язкої з малою теплопровідністю рідини, що інтенсифікує теплообмін в 2–2,5 рази порівняно з теплообміном при ламінарному потоці; при цьому при збільшенні

товщини стрічки тонкостінних сталевих теплообмінників шахтних компресорних установок зі сталі 20X13 при високотемпературному паянні після нагрівання і відпуску у вакуумі з 0,14 до 0,8 мм межа міцності, що визначає довговічність теплообмінника, зростає у квадратичній залежності від 750 до 810 МПа.

Поряд із даними про структуру і властивості сталі в паяному ПРЕ необхідні дані про технологічну міцність сталі в процесі паяння ПРЕ й, зокрема, при змочуванні тонкої стрічки розплавом припою. Ці відомості необхідні для визначення припустимих розмірів ПРЕ, при яких не відбудеться руйнування вузла, що паяється, під власною вагою.

Форма і розмір зразка для випробувань наведені на рис. 2.117 а. У спеціальному пристрої (рис. 2.117 б) автори досліджували залежність руйнування стрічок зі сталі 20X13 товщиною 0,14 мм і сталі 12X18Н9 товщиною 0,19 мм при розтяганні від часу взаємодії з розплавом міді при температурі $1\ 100 + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

а



б

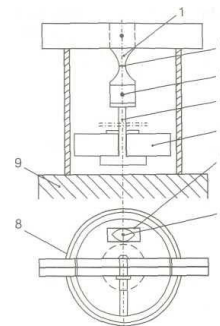


Рисунок 2.117 – Зразок для високотемпературного випробування стрічки (а) і пристрій для високотемпературних випробувань стрічки (б)

Зразок 1 із закріпленою по обидва боки смужкою припою 2 шириною 4–5 мм установлювали в пристрій і закріплювали гвинтами 3. На підвіску 4 установлювали вантаж 5, керамічну пластину 6 і відрізок припою 7, за яким візуально контролювали початок його плавлення. Пристрій поміщали у вакуумну піч на опорі 8, що являє собою тонкостінний сталевий циліндр, установлений на поду печі 9. Циліндр був одночасно екраном, що забезпечує рівномірне нагрівання зразка і припою за рахунок вторинного випромінювання від внутрішньої поверхні циліндра. В експерименті фіксувалося навантаження, прикладене до зразка, і час від початку плавлення припою до моменту руйнування зразка за постійної температури. Якщо упродовж 25–30 хв під дією розтягувального навантаження і розплаву припою зразок не руйнувався, нагрівання припиняли. Результати експериментів подані в табл. 2.48 і на рис. 2.118.

Випробування показали, що міцність стрічок зі сталі 20X13 і 12X18Н9 за температури $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ дорівнює 20–30 МПа, при взаємодії з розплавом міді знижується на порядок і дорівнює 2–3 МПа. Однак наявність навіть невеликої міцності при тривалому контакті з розплавом міді свідчить про можливість паяння тонкостінних ПРЕ без дефектів.

У секції ПРЕ тонкостінні деталі – пластини робочого каналу і насадка – перебувають у процесі паяння в контактi із двох боків із розплавом міді. Двобі-

чне змочування і дифузія розплавленої міді в тонку стрічку при тривалому контакті з розплавом можуть істотно змінити структуру металу. Підтвердження цього одержане при дослідженні композицій тришарового паяного з'єднання з тонких стрічок, застосовуваних для виготовлення ПРЄ (табл. 2.49). Паяний зразок показаний на рис. 2.119. Композицію стрічок вибирали відповідно до табл. 2.49. Між відрізками стрічки розміщали мідну фольгу товщиною 0,04 мм. Температура паяння становила $(1\ 150 \pm 10)^\circ\text{C}$, витримка – 25–30 хв

Таблиця 2.48 – Результати експериментів високотемпературного випробування стрічки

Марка сталі	Товщина, мм	Площа поперечного перерізу, мм ²	Температура випробування, °С	Витримка, с	Напруження, МПа
12X18H9	0,19	0,95	1 090–1 100	60	6,37
				300	3,79
				600	3,26
				690	3,05
				1 260	2,95
20X13	0,14	0,70		30	11,50
				180	5,79
				240	4,36
				450	3,64
				480	3,21
				660	2,93
				1 440	2,71

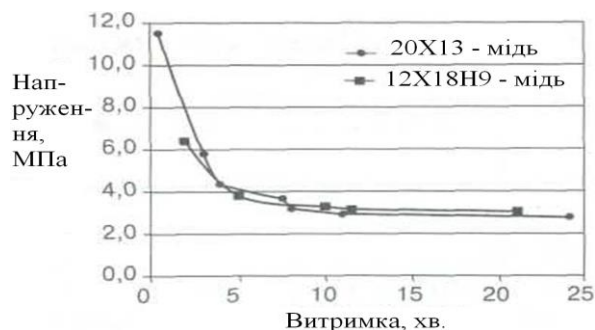


Рисунок 2.118 – Криві впливу на міцність сталеві стрічки тривалості взаємодії з розплавом міді

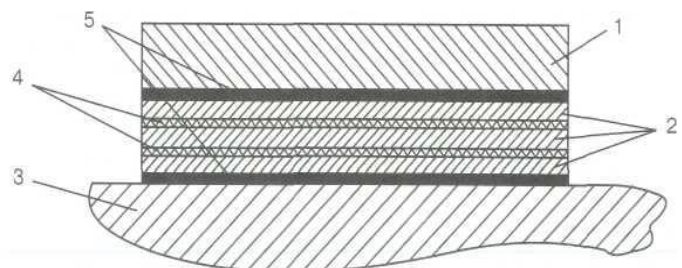


Рисунок 2.119 – Зразок для визначення впливу розплаву міді на з'єднання з різних сталей: 1 – вантаж; 2 – випробовувана сталь; 3 – основа; 4 – припій; 5 – захисна паста

Дослідження мікроструктури паяних з'єднань і порівняння мікротвердості структурних складових паяних швів (табл. 2.50) дозволяє зробити висновки про особливості та механізм структуроутворення. Дифузійна зона в тонкій сталевій стрічці при двобічній взаємодії з розплавом міді має значно більшу ширину порівняно з однією взаємодією за однакових умов нагрівання.

Виявлені механізми структуроутворення паяних міддю з'єднань дозволяють раціонально конструювати нові ПРТ із тонких сталевих стрічок, прогнозувати міцність паяного з'єднання та можливість виконання високотемпературного паяння. При відповідному виборі композиції матеріалів деталей і технології

збирання можна формувати паяні з'єднання ПРЕ, більш міцні, ніж припій, що їх утворює (рис. 2.120).

Таблиця 2.49 – Композиції паяних тришарових з'єднань стрічок

	Верхній шар, метал, товщина, мм	Середній шар, метал, товщина, мм	Нижній шар, метал, товщина, мм
1	20X13; 0,14	20X13; 0,14	20X13; 0,14
2	20X13; 0,14	20X13; 0,14	20X13; 0,14
3	08пс; 0,15	08пс; 0,15	08пс; 0,15
4	08пс; 0,25	08пс; 0,25	08пс; 0,25
5	12X18Н9; 0,19	12X18Н9; 0,19	12X18Н9; 0,19
6	12X18Н9; 0,19	20X13; 0,14	08пс; 0,15

Примітка. У композиції № 2 зразок після паяння піддавали термообробці в муфельній електричній печі при температурі 700 °С і витримці 30 хв Охолодження – на повітрі

Таблиця 2.50 – Мікротвердість структурних складових, паяних міддю швів тонких сталевих стрічок, МПа

Паяне з'єднання	Основний метал	Дифузійна зона середньої стрічки	Дендрит	Матриця шва
08пс + 08пс	950–1 000	1 250–1 450	–	640–720
20X13 + 20X13 (після паяння)	3 700–4 000	2 400–2 600	1 500–2 000	630–730
20X13 + 20X13 (після термообробки)	1 950–2 500	1 800–2 000	1 850	680–770
12X18Н9 + 12X18Н9	1 700–1 900	1 950–2 400	1 800	620–720
08пс + 20X13	900–3 600	1 400–1 600	1 500	720–760
12X18Н9 + 20X13	1 900–3 600	2 600	2 170–2 590	720–760

Деякі включення пронизують стрічку по всій товщині і є причиною утворення мікротеч. Порівняльні дослідження тонких стрічок зі сталей 12X18Н9 і 20X13 показали, що стрічка 12X18Н9 не має наскрізних дефектів металургійного походження. Із цієї причини для виробництва тонкостінних ПРЕ кращою є стрічка 12X18Н9 товщиною більше 0,2 мм (рис. 2.121).

Застосування тонких стрічок із низьковуглецевої сталі 08пс для формування робочих каналів ПРТ можливе, якщо кількість вуглецю у складі металу становить не менше 0,05 %.

2.3.3.3. Дослідження процесу високотемпературного паяння шлікерним припоєм сталевих пластинчасто-ребристих елементів

Паяння шлікером із застосуванням дрібнодисперсних порошоків міді, що випускаються промисловістю, є альтернативою паянню із застосуванням мідної фольги. При цьому при застосуванні мідної фольги гарантовано формується лише паяне з'єднання деталей, а при застосуванні шлікера з мідного порошку формуються не лише шви, але й плакувальний шар на деталях.

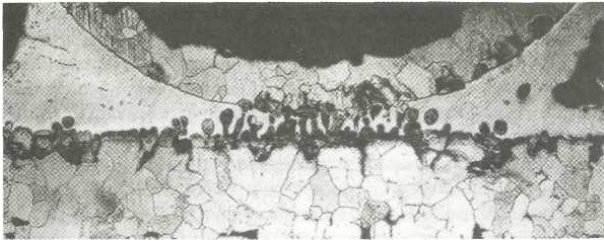


Рисунок 2.120 – Мікроструктура паяного з'єднання пластини зі сталі 20X13 і насадки зі сталі 08кп, армованих стовпчастими дендритами (x 100)

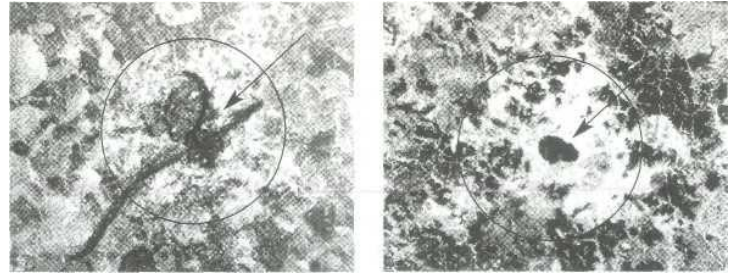


Рисунок 2.121 – Неметалеві включення в стрічці зі сталі 20X13 товщиною 0,15 мм (x 50)

Застосування міді як покриття може забезпечити корозійну стійкість ПРТ із вуглецевих сталей в атмосфері повітря, масла, фреону й у воді.

За допомогою електронного мікроскопа на плакованій поверхні, утвореній шлікером з мідного порошку, виявили мікроскопічні розриви шару (рис. 2.122). Порушення суцільності покриття пов'язане з усадкою, що утвориться при кристалізації рідкої фази. Мікродфекти утворюються на стику двох і особливо трьох кристалітів. Мікродфекти в шарі призводять до утворення точкової корозії в агресивному середовищі.

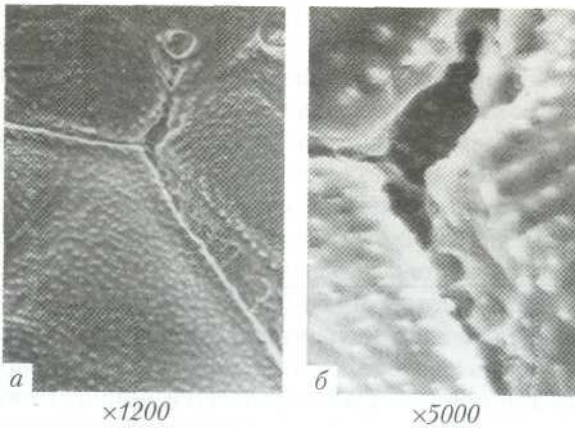


Рисунок 2.122 – Фрактограма поверхні плакувального шару в зоні стику трьох кристалітів

При оптимальному стехіометричному співвідношенні вмісту компонентів суміші утвориться композиційний сплав, у якому евтектика Ni-Cr-Si-B зв'язує утворені бориди, силіциди й комплексні боридосиліциди хрому. Оптимальною за технологічними і металургійними властивостями є суміш евтектичного складу, мас. %:

Ni – 70, Cr – 20, Si – 5, B – 5. Якісний плакувальний шар формується при нагріванні у вакуумі. При такому нагріванні дрібнодисперсні порошки не окиснюються, що є необхідною умовою прояву ефекту контактного плавлення, із шару порошоків видаляються адсорбовані гази, а при плавленні видаляються і розчинені гази. При цьому істотною є швидкість плавлення. Вона не повинна перевищувати 10 °C/хв. При великій швидкості нагрівання в плакувальному шарі утворюються різні за розміром пори (рис. 2.123). Для видалення пор і шлакових включень витримка при утворенні рідкої фази евтектики повинна бути не меншою ніж 10 хв.

При відповідному виборі складу суміші шлікера та параметрів його плавлення у вакуумі формується плакувальний шар завтовшки 40–60 мкм зі структурою, показаною на рис. 2.124. При утворенні евтектики Ni-Cr-Si-B виділяється енергія, і між плакувальним шаром та підкладкою утворюється міцний металевий зв'язок. У результаті дифузії активних елементів кремнію і бору в підкла-

дку утворюється перехідний шар (спай) із пластичного твердого розчину на основі нікелю. Мікротвердість структурних складових і плакувального шару: металу підкладки $H\mu_{10} = 117\text{--}144$ МПа; перехідного шару – спаю $H\mu_{10} = 260\text{--}280$ МПа; плакувального шару $H\mu_{10} = 850\text{--}1\ 020$ МПа.

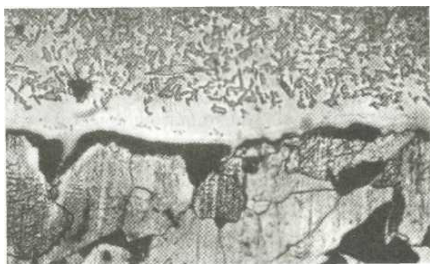


Рисунок 2.123 – Мікроструктура плакувального шару зі сплаву системи Ni-Cr-Si-B, сформованого при нагріванні у вакуумі: а – зі швидкістю 18 °C/хв; б – 5 °C/хв (x 200)

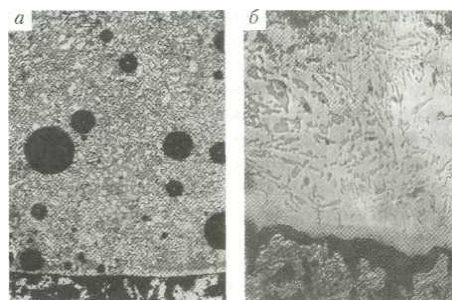


Рисунок 2.124 – Мікроструктура плакувального шару зі сплаву системи Ni-Cr-Si-B, сформованого при нагріванні у вакуумі за температури 980 °C (x 100)

Плакувальний шар на основі сплаву системи Ni-Cr-Si-B збільшує межу міцності тонких матеріалів до 25 % (рис. 2.125).

Склад шлікерів, застосовуваних для паяння і плакування деталей ПРЕ, наведений у табл. 2.51.

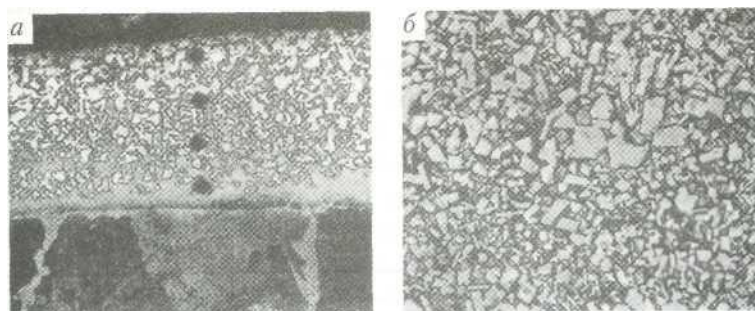


Рисунок 2.125 – Мікроструктура плакувального шару, виконаного шлікером системи Ni-Cr-Si-B, із додаванням 60 % суміші ВК6: а – переріз; б – поверхня шару (x 200)

Технологічний маршрут плакування та паяння деталей ПРЕ складається з таких основних операцій: приготування шлікера; підготовки поверхні деталей; нанесення шлікера; сушіння шлікера; плавлення шлікера. Шлікер готують тривалим змішуванням у конусних змішувачах композиції порошоків і зв'язуванням. При змішуванні в конус змішувача додають сталеві або порцелянові кулі для подрібнювання частинок порошку і кращого перемішування суміші. Деталі знежирюють у лужних розчинах або органічних розчинниках. Замість хімічної обробки можна застосовувати нагрівання деталей в електричній печі до температури 400–450 °C. Шлікер наносять зануренням ПРЕ в ємність зі шлікером. Після занурення ПРЕ розміщують на вібрувальному піддоні для видалення над-

лишків шлікера з каналів. Покриті шлікером ПРЕ сушать в електричних шафах за температури 100–120 °С для видалення розчину спирту. Плавлення шлікера виконують у вакуумній печі при розрідженні 0,01–1,3 Па.

Таблиця 2.51 – Склад шлікерів для паяння і плакування сталевих ПРЕ

Компонент	Марка шлікера					
	ШМ	ШМЖ-90	ШМЖ-60	ШМГСП	1М	ВКМ65
	Вміст компонента, %					
Мідь	65	58	40	64	–	–
Залізо	–	6,5	25	–	–	–
Марганець	–	–	–	0,9	–	–
Кремній	–	–	–	2,1	3	2
Бор	–	–	–	1,8	3	2
Нікель	–	–	–	–	45,5	29
Хром	–	–	–	–	13	8
Суміш	–	–	–	–	–	25
Бентоніт	1,3	1,5	1,3	0,65	1,2	1,5
Крохмаль	–	–	–	0,15	–	–
Гліцерин	–	–	–	6,4	–	–
Етиловий спирт	20	21	21	17	20	19,5
Дистильована вода	13,7	13	12,7	7	14,3	13

РОЗДІЛ 3 ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ РОДОВИЩ НА ОСНОВІ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖНОГО КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ

3.1. Підвищення конденсатівіддачі газоконденсатних родовищ шляхом впливу на пласти азотом

3.1.1. Азотна компресорна станція для генерування інертного газового середовища

Азотна компресорна станція належить до систем генерування інертного газового середовища на основі азоту для забезпечення технологічних процесів у нафтовидобувній, газовій, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості. Застосування нових конструктивних елементів установки, нового характеру зв'язку складових частин установки, зокрема застосування для охолоджувачів станції додаткової лінії подання охолоджувальної рідини компресорної станції, підвищує ефективність роботи охолоджувачів та зменшує габарити станції. Застосування ресиверів поліпшує ефективність роботи конструктивних елементів станції, рівномірність роботи конструктивних елементів та ефективність роботи адсорбційного газороздільного модуля, забезпечуючи ефективний процес його регенерації.

На рисунку 3.1 наведена схема азотної компресорної станції для приготування азотної захисної атмосфери, а на рис. 3.2 – схема градирні з розміщеним у збірнику охолодженої води градирні проміжним охолоджувачем охолоджувальної рідини лінії подання охолоджувальної рідини.

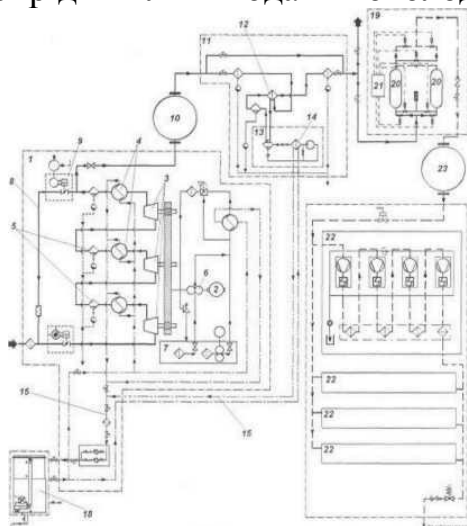


Рисунок 3.1 – Схема азотної компресорної станції

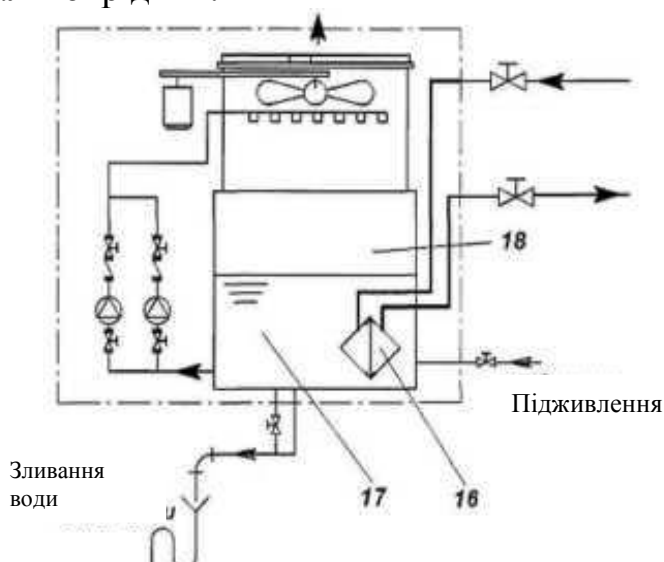


Рисунок 3.2 – Схема градирні

Під час роботи станції повітря послідовно стискається в ступенях блока стиснення повітря 1 нагнітачами 3, охолоджується охолодниками 4 між ступенями нагнітання і звільняється від вологи у вологовіддільниках 5. У випадку

порушення стійкості в роботі відкривається пропускний клапан 9, і стиснене повітря після третього ступеня стиснення повітря накидається по лінії 8 на вхід блока стиснення повітря 1. При штатній роботі повітря після третього ступеня стиснення повітря спрямовується в ресивер 10, після якого скеровується на вхід блока фільтрів 11, де воно очищається і охолоджується в охолоднику 12, зокрема із застосуванням холодильної машини 13, що забезпечує глибокий рівень охолодження. Охолоджувальні станції 14 і 4, приєднані до лінії 15, охолоджуються охолоджувальною рідиною, що, у свою чергу, охолоджується в проміжному охолоднику 16, охолоджувальний бік якого розміщений у збірнику 17 охолодженої води градирні 18. Оброблене в блоці 11 повітря спрямовується в газорозподільний модуль 19, і в адсорберах 20, які за сигналом керуючого блока 21 працюють циклічно, від повітря відділяється азот. Проміжний ресивер 23 забезпечує рівномірне завантаження устаткування і забезпечує ефективний процес продування та регенерації адсорберів 20 за сигналом керуючого блока 21. Збагачений у газорозподільному модулі 19 азотом газ через проміжний ресивер 23 спрямовується в блоки стискання азоту 22. Для забезпечення необхідної продуктивності азотної компресорної станції в роботу може бути введено кілька паралельно під'єднаних блоків стискання азоту 22.

3.1.2. Азотна станція для накачування газоподібного азоту в свердловини газоконденсатних родовищ

Застосування технологій розроблення із використанням методів підтримки пластового тиску може забезпечити підвищення газовіддачі на 10–15 %, а конденсатовіддачі – на 20–30 %. Гостра актуальність проблеми поточного стану енергоресурсів в Україні обумовила визначення шляхів підвищення інтенсифікації пластового тиску з використанням сучасних вторинних технологій активного впливу на свердловини. Зокрема, на Котелевському родовищі Полтавської області погоджено застосування газоподібного азоту, одержаного з атмосферного повітря безпосередньо на місці його використання.

У результаті тривалої попередньої роботи ТОВ «МІКЕМ» концерну «НІКМАС» було розроблено і затверджено технічне завдання на виготовлення станції блочно-модульного виконання для цілодобового виробництва 50 000 м³/добу газоподібного азоту для сайклінг-процесу (рис. 3.3). Цей комплекс устаткування забезпечує одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту з концентрацією не менше 99 % із його подальшим накачуванням у свердловину газоконденсатного родовища (ГКР) під тиском до 250 бар.

Моніторинг і керування роботою всього устаткування, що експлуатується в цілодобовому автоматичному режимі, здійснюється з єдиного віддаленого пульта через систему вищого рівня з мінімальною присутністю персоналу. Весь комплекс складається з окремих блоків-боксів виконання У1, з'єднаних між собою комунікаціями (рис. 3.4, табл. 3.1, 3.2). Устаткування модуля компресора середнього тиску (відцентровий компресор, компресор стартового повітря, насосний вузол і система керування) монтується усередині одного контейнера дуже близько до градирні (рис. 3.5). Як компресор середнього тиску застосову-

ється компресор об'ємного стискання відцентрового типу з водяним охолодженням. Він призначений для стискання атмосферного повітря до тиску газорозділення.

Градижня з автоматичним насосним вузлом призначена для охолодження води, використовуваної як охолоджувальна рідина, що відбирає тепло стисненого повітря на ступенях стискання відцентрового компресора і холодильного осушувача модуля підготовки повітря і загальної системи керування. Автоматичний насосний вузол призначений для подачі охолоджувальної рідини до відцентрового компресора і холодильного осушувача (рис. 3.6). Устаткування модуля підготовки стисненого повітря й операторська (фільтр попереднього й тонкого очищення, холодильний осушувач, система керування станцією) монтується усередині одного контейнера, розділеного усередині перегородкою на операторську й технологічний блок.

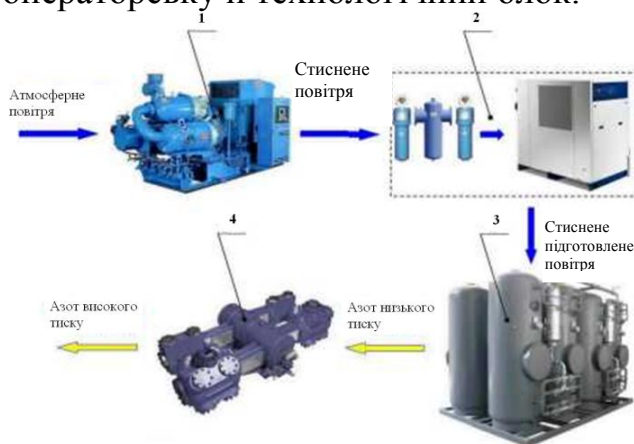


Рисунок 3.3 – Спрощена схема дії азотної станції: 1 – модуль компресора середнього тиску; 2 – модуль підготовки стисненого повітря; 3 – модуль газорозподільний; 4 – модуль компресора високого тиску

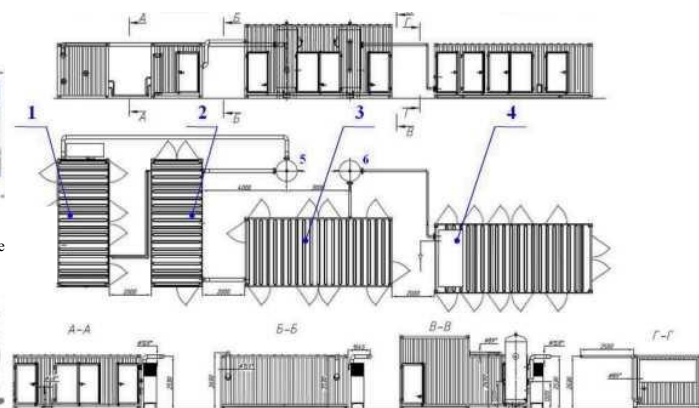


Рисунок 3.4 – Схема розміщення модулів азотної станції: 1 – модуль компресора низького тиску; 2 – модуль підготовки стисненого повітря; 3 – модуль газорозподільний; 4 – модуль компресора високого тиску; 5 – ресивер стисненого повітря; 6 – ресивер азоту

Таблиця 3.1 – Комплектація азотної станції

Найменування основних комплектуючих
<p>Модуль компресора середнього тиску:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контейнер із системою опалення, освітлення та вентиляції; – повнокомплектний відцентровий компресор із привідним електродвигуном і всмоктувальним повітряним фільтром; – поршневий компресор стартового повітря; – градижня* з насосним вузлом; – система керування модуля
<p>Модуль підготовки стисненого повітря і загальної системи керування:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контейнер із системою опалення й освітлення; – холодильний осушувач рефрижераторного типу; – фільтр попереднього очищення; – фільтр тонкого очищення; – загальна система керування станції
<p>Модуль газорозподільний:</p> <ul style="list-style-type: none"> – контейнер із системою опалення й освітлення; – генератори азоту адсорбційного типу
<p>Модуль компресора високого тиску:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повнокомплектний дотискний компресор із привідним електродвигуном; – система керування модулем

Продовження таблиці 3.1

Найменування основних комплектуючих
Запірна, запобіжна і регулювальна арматура об'ємом, що забезпечує номінальну роботу станції
Міжмодульна трубопровідна обв'язка
Міжмодульні кабельні комунікації
Електроустаткування

* Градирня монтується окремо від модуля компресора низького тиску

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики азотної станції

Найменування параметра	Розмірність	Значення
Стисливе середовище	атмосферне повітря	
Середовище, що дотискається	газоподібний азот	
Об'ємна продуктивність станції за азотом, зведена до нормальних умов	м ³ /с (м ³ /хв)	0,67 (40)
Тиск повітря початковий, номінальний	МПа	0,101 (1,033)
Тиск азоту кінцевий надлишковий, не більше	МПа (кгс/см ²)	25 (250)
Чистота азоту	%	99
Напруга живлення устаткування станції	В	6 000/380/220/24
Загальна споживана потужність устаткуванням станції, не більше	кВт	950
Кількість контейнерів з устаткуванням станції	од.	4
Виконання електроустаткування станції	невибухозахисне	
Режим роботи	безперервний	



Рисунок 3.5 –
Відцентровий компресор

Холодильний осушувач та система фільтрів призначені для очищення стисненого відцентровим компресором атмосферного повітря від механічних домішок та його осушення до заданої точки роси перед подачею на газорозділення в модуль газороздільний. Фільтри попереднього і тонкого очищення, холодильний осушувач (усередині корпусу) обладнані автоматичними конденсатовідвідниками, що забезпечують скидання конденсату в загальну дренажну систему (рис. 3.7).

конденсату в загальну дренажну систему (рис. 3.7).



Рисунок 3.6 – Градирня
з автоматичним насосним вузлом



Рисунок 3.7 – Холодильний осушувач
та система фільтрів

Система керування станції (рис. 3.8) забезпечує централізоване автоматичне (ручне) керування устаткуванням модулів станції за допомогою програмного контролера. Модуль компресора високого тиску призначений для дотискання газоподібного азоту до заданого тиску, складається з групи поршневих дотискних компресорів (рис. 3.9). До складу модуля газорозподілу входять генератори азоту адсорбційного типу, призначені для одержання зі стисненого підготовленого повітря газоподібного азоту заданої чистоти (рис. 3.10). Блоки-контейнери (рис. 3.11) являють собою зібрану (зварену) конструкцію, що складається із суцільнозвареного каркаса; сендвіч-панелей; декоративних зовнішніх жалюзі; дво- та одностулкових дверей із запірними механізмами.



Рисунок 3.8 – Система керування станції

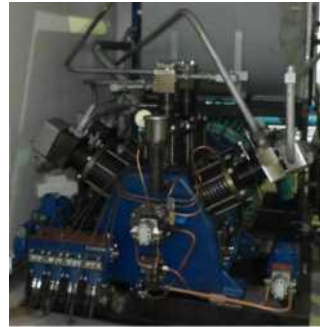


Рисунок 3.9 – Модуль компресора високого тиску

Контейнер обладнаний припливно-витяжною вентиляцією (рис. 3.12). З боку всмоктування повітря контейнер обладнаний нерегульованими жалюзі, що самовідкриваються зсередини. З боку нагнітального вентилятора – жалюзі, що самовідкриваються. Відкриття і закриття відбувається під впливом повітряного потоку, створюваного вентиляторами. Система вентиляції, що складається з двох витяжних вентиляторів, припливних і витяжних гравітаційних жалюзі, в автоматичному режимі підтримує задану температуру усередині контейнера в теплу пору року.



Рисунок 3.10 – Модуль газорозподілення



Рисунок 3.11 – Блоки-контейнери



Рисунок 3.12 – Комплектація блока-контейнера: 1 – система вентиляції; 2 – двері; 3 – системи освітлення; 4 – система опалення; 5 – фітинги

Контейнер обладнаний системою робочого й аварійного освітлення відповідно до санітарних норм. Система опалення складається із настінних нагрівачів, що забезпечують відповідний мікроклімат у робочій зоні контейнера в холодну пору року і здійснюють прогрівання устаткування перед пуском. Для обігрівання контейнера так само використовується тепло, що виділяється в системі охолодження компресорів. При підвищенні температури усередині контейнера вище від заданої ($10\text{ }^{\circ}\text{C}$) опалення автоматично вимикається.

3.1.3. Метод штучного впливу на пласти азотом для підвищення конденсатовіддачі (на прикладі Котелевського ГКР)

Значна кількість ГКР, зокрема і в Україні, уже вироблена або перебуває на завершальній стадії розроблення. Оскільки залишкові запаси рідких вуглеводнів у надрах цієї групи ГКР досить великі (50–60 % від початкових запасів), існує актуальна проблема підвищення конденсатовіддачі об'єктів, що характеризуються виснаженими енергетичними ресурсами, а саме низьким пластовим тиском.

У нашій країні реалізація інноваційних методів застосування інертного газу була здійснена на об'єкті ГПУ «Полтавагазвидобування» Котелевського ГКР. На цьому об'єкті разом із концерном «НІКМАС» уведена в експлуатацію станція азотна адсорбційна ААВН-40/25У1 (рис. 3.13–3.15), що одержує газоподібний азот із атмосферного повітря й накачує його у пласт під тиском 250 атм. Станція працює в автоматичному режимі з передачею параметрів на автоматизоване робоче місце оператора й оснащена системою віддаленого моніторингу.

Для безвідмовної роботи станція ААВН-40/25 У1 обладнана системами КПП і А та електропостачання; припливно-витяжної вентиляції; охолодження устаткування розчином етиленгліколю; диференціально-поздовжнього захисту трансформаторів; освітлення й електроопалення.

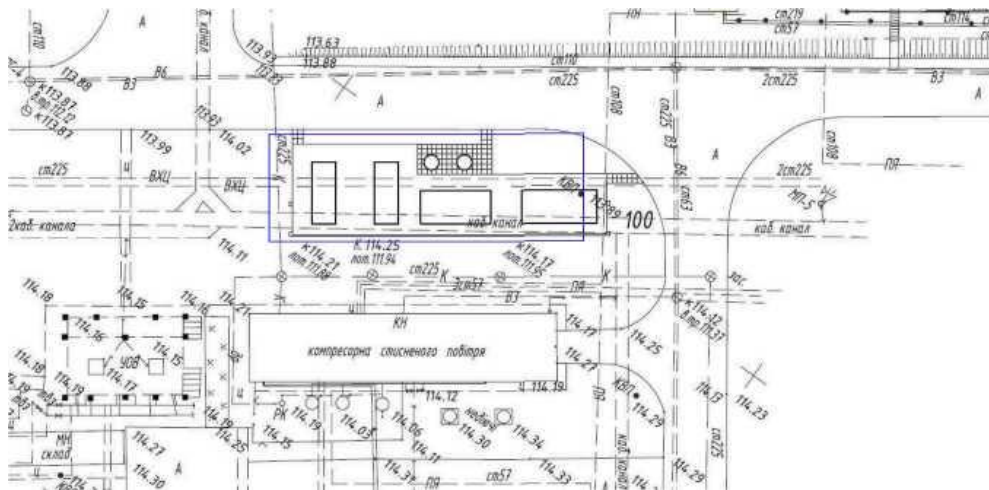


Рисунок 3.13 – Схема розміщення азотної станції на генеральному плані Котелевського ГКР

Станція має блоково-модульне виконання (див. рис. 3.14, 3.15), тобто складається з окремих модулів: модуля компресора низького тиску (МКНТ), модуля підготовки стисненого повітря (МПСП), модуля поділу повітря (МПП), модуля компресора високого тиску (МКВТ), модуля охолоджувача теплоносія (МОТ), ресиверів (азоту й повітря).

Атмосферне повітря проходить через МКНТ (рис. 3.16), де очищається від пилу, стискається до необхідного тиску і накопичується в ресивері повітря. Стиснене повітря проходить через МПСП (рис. 3.17), де відбувається остаточне очищення від механічних домішок і масла. Вологовміст повітря знижується до точки роси 3 °С.



Рисунок 3.14 – Зовнішній вигляд станції ААВН-40/25 У1



Рисунок 3.15 – Робота станції ААВН-40/25 У1 на Котелевському ГКР



Рисунок 3.16 – Модуль компресора низького тиску станції ААВН-40/25 У1



Рисунок 3.17 – Модуль підготовки стисненого повітря станції ААВН-40/25 У1

Сухе, чисте стиснене повітря надходить на МРП (рис. 3.18), де відбувається його поділ в адсорберах. Збагачене киснем повітря скидається в атмосферу. Азот після МРП накопичується в ресивері азоту. Далі азот стискається в МКВТ (рис. 3.19) до тиску 250 кгс/см^2 і нагнітається у свердловину.



Рисунок 3.18 – Модуль поділу повітря станції ААВН-40/25 У1



Рисунок 3.19 – Модуль компресора високого тиску станції ААВН-40/25 У1

Для забезпечення надійної роботи устаткування станції ААВН-40/25 У1 передбачене рідинне охолодження за допомогою циркуляції теплоносія (40 % розчин етиленгліколю). Теплоносій за допомогою насосної станції подається в МКВТ і МПСП. Гарячий теплоносій охолоджується в охолоджувачі теплоносія (ОТ). Для нормальної роботи ОТ (градирні випарного типу) необхідно забезпечити подачу води для поповнення ємності ОТ (рис. 3.20, 3.21). Автоматика станції побудована як ієрархічна дворівнева система і поставляється з єдиною системою автоматичного керування (САК) і контролю технологічного процесу виробітку і накачування азоту та автоматизованим робочим місцем оператора (АРМ) (рис. 3.22).



Рисунок 3.20 – Ресивери повітря і азоту станції ААВН-40/25У1



Рисунок 3.21 – Охолоджувач теплоносія станції



Рисунок 3.22 – САК станції ААВН-40/25У1

З урахуванням позитивних результатів уведення в експлуатацію станції ААВН-40/25У1 на Котелевському ГКР застосування методів штучного впливу на пласти для підвищення конденсатовіддачі, а також заміщення об'ємів буферного газу на ПХГ необхідно вважати найважливішим фундаментальним завданням найближчих років.

3.2. Видобування газу за допомогою дотискних компресорних станцій СГВ (на прикладі Більського НГКР)

3.2.1. Блокова компресорна станція для підвищення тиску в малодебітних свердловинах

Блокова компресорна станція призначена для застосування в установках компресорів та станцій, що підвищують тиск, наприклад, від низького в малодебітних бурових свердловинах до тиску, необхідного для роботи газотранспортного комплексу. Новим у станції є те, що вона додатково містить магістраль перекидання газу після масловіддільника у вхідну магістраль, а лінія подачі масла через фільтр масла на ущільнення конструктивних елементів гвинтового компресора розділена щонайменше на дві паралельні гілки, кожна з яких містить свій повнопотоковий масляний фільтр і запірні засоби, а на виході паралельні гілки фільтрів об'єднані.

Працює блокова компресорна станція так (рис. 3.23). Стиснений газ магістраллю 1 подається до блока гвинтового компресорного агрегата 2. Упродовж переміщення магістраллю 1 газ очищається у фільтрі 3. Робота гвинтового компресорного агрегата 2 забезпечується приводом 4. Стиснена газомасляна суміш із гвинтового компресорного агрегата 2 подається вихідним трубопроводом 5 у масловіддільник 6. Відділена в масловіддільнику 6 газова фаза додатково очищається у фільтрі-сепараторі 8 і спрямовується до споживача лінією відведення газу 7, на якій забезпечуються охолодження газу в охолоджувачі 9 та додаткове очищення в газовому фільтрі 10. Пульсації тиску, які можуть виникнути після гвинтового компресорного агрегата 2, згладжуються за допомогою лінії 23, що з'єднує верхню частину масловіддільника 6 з верхньою частиною вихідної пустоти гвинтового компресора 2. Масло, що виділилося в масловіддільнику 6, лінією 11 відведення масла подається на очищення до фільтра масла 12, охолоджується в охолоджувачі масла 13 із байпасною лінією 14. У період пуску станції масло байпасною лінією 14 обходить охолоджувачі масла 13. Оброблене масло за допомогою масляного насоса 15 спрямовується для подальшого використання, зокрема у масловіддільник 6, і лініями подачі масла – у гвинтовий компресорний агрегат 2. У гвинтовий компресорний агрегат 2 масло лінією 16 впорскується в робочу пустоту гвинтового компресора, а лінією подачі масла через один із фільтрів із блока фільтрів масла 18 масло подається на ущільнення конструктивних елементів гвинтового компресора 2.

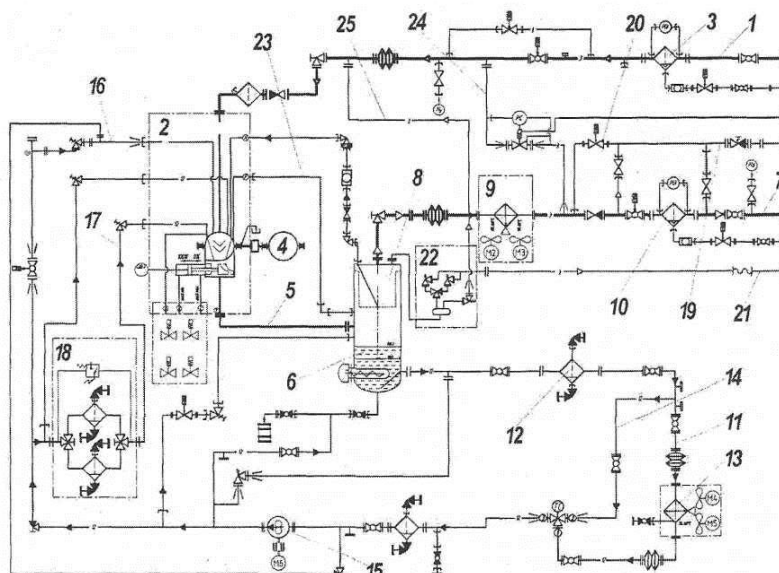


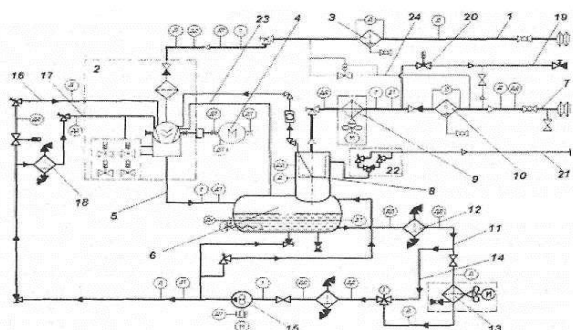
Рисунок 3.23 – Блокова компресорна станція

При виникненні критичних ситуацій газ лінією 19 через попереджувальний клапан 20 викидається в лінію відведення газу 7 після охолоджувача газу 9. При виникненні критичних ситуацій після стиснення газу в компресорному агрегаті, межі яких установлюються блоком 22 попереджувальних клапанів із налаштуваннями на групу критичних ситуацій, газ лінією 21 викидається в атмосферу або у вхідну магістраль після фільтра 3.

3.2.2. Дотискні гвинтові компресорні станції паливного газу типу СГВ для живлення газотурбінних електростанцій

На рисунку 3.24 а наведена схема дотискної блокової компресорної станції для підвищення тиску газу для забезпечення роботи газотурбінного двигуна у складі газотурбінної електростанції, на рис. 3.24 б – фронтальний вигляд блокової компресорної станції без зовнішнього огороження, на рис. 3.24 в – вигляд зверху, а на рис. 3.24 г – вигляд збоку.

а



б

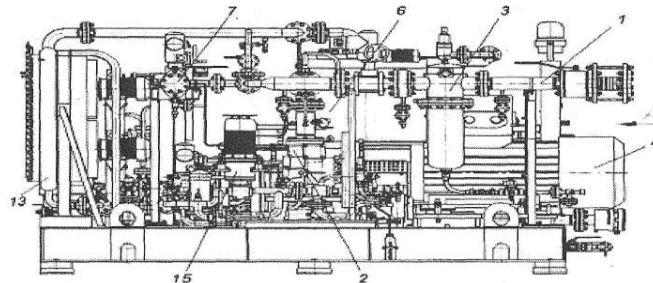
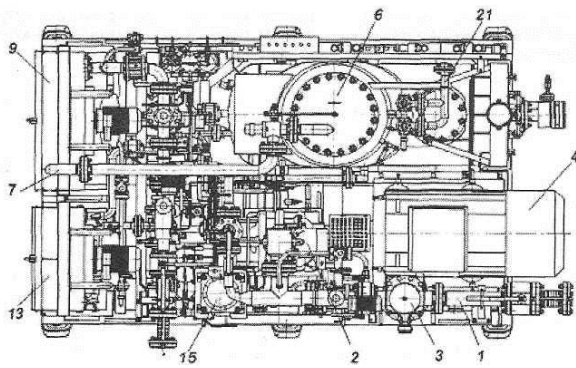


Рисунок 3.24 – Дотискна блокова компресорна станція для підвищення тиску газу: а – схема станції; б – фронтальний вигляд станції без зовнішнього огороження; в – вигляд зверху; г – вигляд збоку

В



Г

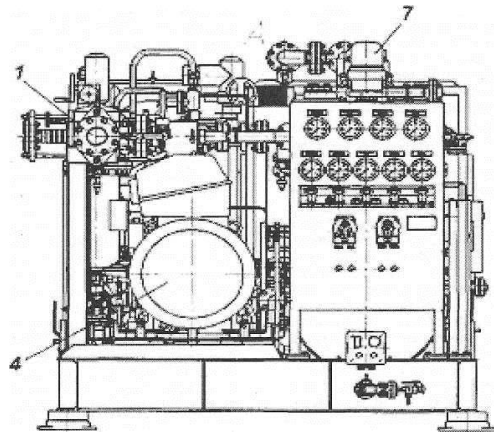


Рисунок 3.24, аркуш 2

Працює дотискна блокова компресорна станція так. Стиснений газ магістраллю 1 подається до блока гвинтового компресорного агрегата 2. Упродовж переміщення магістраллю 1 газ очищається у фільтрі 3, і його вхідні параметри можуть бути досліджені датчиками тиску і температури, розміщеними на цій лінії. Робота гвинтового компресорного агрегата 2 забезпечується приводом 4. Стиснена газомасляна суміш із гвинтового компресорного агрегата 2 вихідним трубопроводом 5 подається у масловіддільник 6. Відділена в масловіддільнику 6 газова фаза додатково очищається у фільтрі-сепараторі 8 і спрямовується до споживача лінією відведення газу 7, на якій забезпечуються його охолодження в охолоджувачі 9 та додаткове очищення в газовому фільтрі 10. Пульсації тиску, які можуть виникнути після гвинтового компресорного агрегата 2, згладжуються за допомогою лінії 23, що з'єднує верхню частину масловіддільника 6 із верхньою частиною вихідної порожнечі гвинтового компресора 2.

Масло, що відділилося в масловіддільнику 6, лінією 11 відведення масла подається на очищення у фільтр масла 12, охолоджується в охолоджувачі масла 13 із байпасною лінією 14. У період запуску станції масло байпасною лінією 14 обходить охолоджувачі масла 13. Оброблене масло за допомогою масляного насоса 15 спрямовується на подальше використання, зокрема у масловіддільник 6, і лініями подачі масла – у гвинтовий компресорний агрегат 2. У гвинтовий компресорний агрегат 2 масло лінією 16 впорскується в робочу порожнечу гвинтового компресора, а лінією подачі масла 17 через фільтр масла 18 масло подається на ущільнення конструктивних елементів гвинтового компресора 2. При виникненні критичних ситуацій газ лінією 19 через попереджувальний клапан 20 викидається в лінію відведення газу 7 після охолоджувача газу 9. При виникненні критичних ситуацій після стискання в компресорному агрегаті, межі яких установлюються блоком 22 попереджувальних клапанів із налаштуванням на групу критичних ситуацій, газ лінією 21 викидається в атмосферу (або у смолоскипову систему, на рис. не показано).

Загальний вигляд, схема виготовленої дотискної компресорної станції та її технічні параметри наведені на рис. 3.25, 3.26 і в табл. 3.3.



Рисунок 3.25 – Дотискна компресорна станція

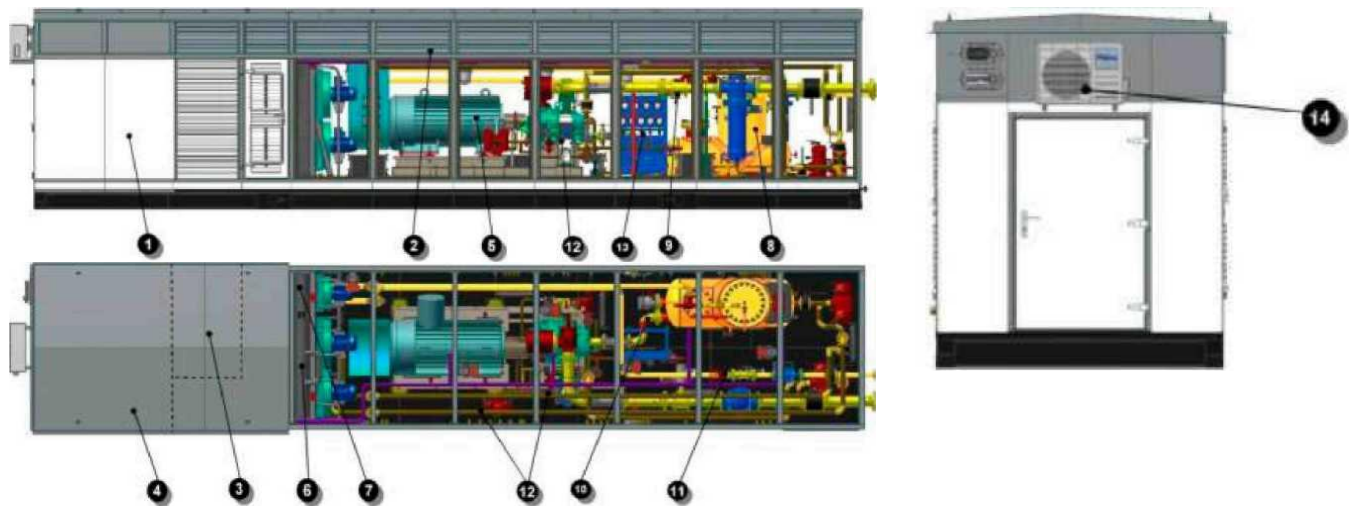


Рисунок 3.26 – Схема дотискної компресорної станції:

- 1 – контейнер; 2 – відсік компресорного устаткування; 3 – відсік системи пожежогасіння, 4 – відсік КППіА; 5 – агрегат компресорний; 6 – блок охолодження масла; 7 – блок охолодження газу; 8 – масловіддільник; 9 – система трубопроводів усмоктування; 10 – труба нагнітання; 11 – система трубопроводів нагнітання; 12 – масляна система; 13 – манометрова панель; 14 – кондиціонер відсіку КППіА; 15 – компресорні машини типу СГВ

Таблиця 3.3 – Технічні параметри станції

Потужність електродвигуна, кВт	200–630
Об'ємна продуктивність, м ³ /хв	20–100
Тиск газу початковий, МПа (кгс/см ²), надлишковий	0,4 (4)
Тиск газу кінцевий, МПа (кгс/см ²), надлишковий	2,6 (26)
Робоче (стисливе) середовище	Природний газ, ПНГ
Температура газу початкова, °С	10–30
Температура газу кінцева, °С	Не більше 75
Габаритні розміри установки, мм	12 192 × 2 438 × 3 100
Маса станції (не більше), кг	32 000

3.2.3. Компресорне устаткування для видобування, збирання і транспортування газу з низьконапірних та малодебітних свердловин

ТОВ «МІКЕМ» концерну «НІКМАС», застосовуючи наявний у нього досвід виробництва гвинтових газових компресорів, створило ряд газових гвинтових компресорних агрегатів, установок та станцій продуктивністю до 250 м³/хв і тиском нагнітання від 25 до 52 кгс/см². Гвинтові компресорні установки можуть бути використані для збирання і транспортування газу, сепарації, очищення, осушення, поділу, подачі в газову турбіну та ін.

Необхідно констатувати, що газовидобування в Україні щорічно знижується. В умовах постійного зменшення пластового тиску видобуток газу доводиться проводити за допомогою дотискних компресорних станцій (ДКС). Зараз у такий спосіб добувається 65 % газу по всій території України. Тому питання будівництва нових та реконструкції існуючих ДКС набуває все більшої актуальності.

До 2015 р. у ДК «Укргазвидобування» заплановане впровадження компресорів малої потужності – до 300 кВт, які необхідно установлювати на території окремих або груп малодебітних свердловин, що дасть можливість додатково видобувати до 1 млрд куб. м газу за рік. На реалізацію цієї програми необхідні інвестиції обсягом 800 млн грн (табл. 3.4).

Таблиця 3.4 – Прогноз видобутку газу ДК «Укргазвидобування» на 2015–2022 рр. при введенні нових дотискних компресорних станцій, млрд м³

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
З уведенням нових ДКС	15,1	15,2	15,3	15,4	15,5	15,5
Без уведення нових ДКС	8,2	7,6	7,0	6,4	5,8	5,6

На Більському газоконденсатному родовищі реалізований проект гвинтової газової компресорної установки СГВв 315-20/035-25 У1, що забезпечує відбирання газу із семи низьконапірних газових свердловин із залишковим тиском 1,1–2,0 кгс/см², відбирання попутного нафтового газу від наявної на родовищі установки сепарації нафти, газу із танків зберігання і стабілізації газового конденсату, а також смолоскиповий газ, наявний на родовищі.

Газ компримується в мережу споживача з тиском 17–25 кгс/см². За перший рік експлуатації здійснене додаткове видобування 12,0 млн м³ газу. Станція працює в автоматичному режимі з передачею інформації про параметри в диспетчерську і за необхідності може бути оснащена системою віддаленого моніторингу.

Реалізацію цієї програми запропоновано здійснити на об'єкті ГПУ «Полтавагазвидобування» Більського НГКР, на якому разом із концерном «НІКМАС» у другому кварталі 2012 року уведена в експлуатацію газова гвинтова станція СГВв 315-20/0,5-25 У1 (рис. 3.27 і 3.28). Робота ДКС, оснащеної СГВв 315-20/0,5-25 У1, дозволяє додатково перекачувати від 20 до 100 тис. м³/добу низьконапірного газу тиском від 0,15–0,5 до 1,7–2,6 МПа (рис. 3.29) при споживаній потужності електропривода не більше 315 кВт.

Для безвідмовної роботи станція СГВв 315-20/0,5-25 У1 обладнана системами КІП і А та електропостачання припливно-витяжної вентиляції; газоаналізу і пожежної сигналізації, продування інертним газом, освітлення й електроопалення.



Рисунок 3.27 – Зовнішній вигляд газової гвинтової станції СГВв 315-20/0,5-25 У1



Рисунок 3.28 – Газова гвинтова станція СГВв 315-20/0,5-25 У1 на УКПНГ, Більськ

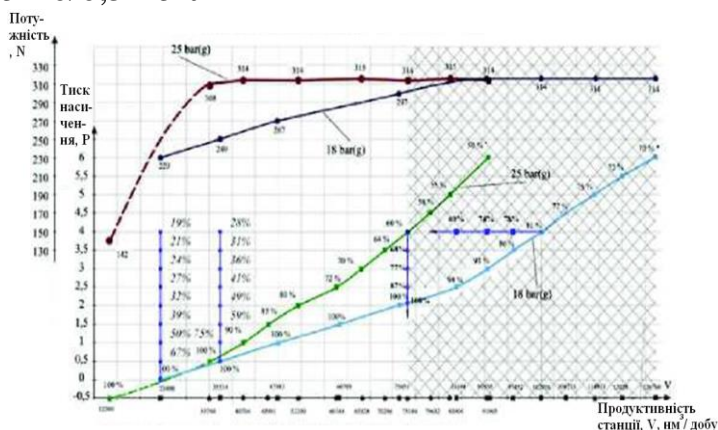


Рисунок 3.29 – Залежність продуктивності станції СГВв 315-20/0,5-25 У1 від тиску всмоктування

Станція складається із двох теплозвукоізолювальних 20-футових контейнерів (рис. 3.30): компресорного (установленого у вибухонебезпечній зоні); КІП і А та електропостачання (розміщеного на відстані 12 м від компресорного контейнера). На станції встановлений гвинтовий маслозаповнений компресор типу «ST» (рис. 3.31) виробництва GRASSO (Німеччина) із внутрішнім ступенем стискання 4,8 і робочим тиском до 2,8 МПа із регулюванням продуктивності від 100 до 10 % золотником.

Подача масла в компресор здійснюється насосною системою (насос фірми KRACHT) (рис. 3.32) із фільтрацією масла у фільтрах грубого, тонкого і надтонкого очищення (рис. 3.32, 3.33) із фільтроелементами з нержавіючої сталі з можливістю їх багаторазового очищення і використання.



Рисунок 3.30 – Компресорний контейнер і контейнер КІП і А



Рисунок 3.31 – Гвинтовий блок типу «ST»



Рисунок 3.32 – Масляний насос, фільтри грубого і тонкого очищення масла



Рисунок 3.33 – Здвоєний масляний фільтр надтонкого очищення

Як система охолодження масла і газу (рис. 3.34) застосовується повітряна система з нержавіючими теплообмінниками пластинчасто-ребристого типу виробництва АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш». Під час роботи на номінальному режимі безповоротне віднесення масла становить не більше 1 мг/м^3 , що досягається за рахунок застосування масловіддільника із декількома ступенями сепарації при зміні швидкості та напрямку потоку газомасляної суміші та відділення аерозолів масла коалесценцією і коагуляцією у фільтрі-сепараторі виробництва MANN+Hummel (Германія). Це дозволяє станції працювати тривалий час без дозаправлення маслом.

Автоматична система газового (вуглекислотного) пожежогасіння і пожежної сигналізації (рис. 3.35) з датчиками полум'я дозволяє здійснити захист компресорної станції як в автоматичному, так і в ручному режимі з компресорного модуля, а також із операторської (контейнер КІП і А та електропостачання) і диспетчерської Більського НГКР.

Модуль газового пожежогасіння СГП-2-80 з балонами і ваговими пристроями (рис. 3.35) розміщений у відсіку пожежогасіння станції. Шафа керування «АС-ПССТ» розміщена в операторській (контейнер КІП і А). Приймально-контрольний пусковий прилад ППКП «Парус» розміщений у диспетчерській (рис. 3.35).

Система газовиявлення виготовлена на базі сигналізатора ТХС-1 для контролю складу вуглеводневих парів і концентрації їхнього вибухонебезпечного вмісту в повітрі. Вона складається з блока оброблення сигналів (БОС-1), встановленого в шафі керування, і датчика TD-XP, встановленого в компресорному відсіку. При 10 % нижньої межі концентрації вибуховості (НКПВ) вмикається витяжна вентиляція підкапотного простору компресорної станції, а при 20 % НКПВ станція зупиняється (рис. 3.36).



Рисунок 3.34 – Система охолодження масла і газу



Рисунок 3.35 – Система пожежогашіння



Рисунок 3.36 – Система газовиявлення

Освітлення робочого простору компресорного модуля, відсіку пожежогашіння і зовнішнього освітлення здійснюється світильниками вибухозахищеного виконання (рис. 3.37), освітлення модуля (контейнера) системи автоматики, керування і електропостачання – світильниками загальнопромислового виконання (рис. 3.38). Для нагрівання станції і підтримання додатної температури в непрацюючій станції вона обладнана ребристими обігрівачами у вибухобезпечному виконанні (рис. 3.38). Нагрівачі керуються автоматично від контролера власним датчиком температури.

Станція обладнана місцевою манометровою панеллю (рис. 3.39) для візуального контролю роботи станції із кнопковими постами для запуску, зупинення станції і маслососа. Також є кнопка аварійного зупинення.

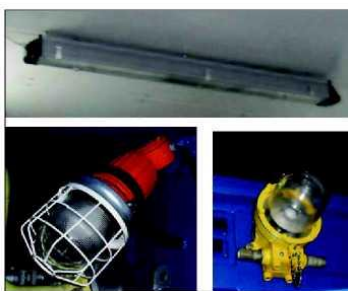


Рисунок 3.37 – Система освітлення



Рисунок 3.38 – Ребристий обігрівач



Рисунок 3.39 – Манометрова панель

Система автоматики, керування і електропостачання (САК і Е) призначена для керування станцією, візуального контролю параметрів, захисних блокувань, захисного вимкнення при переході контрольованих параметрів за межі припустимих значень, оперативної світлової та звукової сигналізації (рис. 3.40).

З урахуванням позитивних результатів введення в експлуатацію КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 (рис. 3.41) на Більському УКПГ і раніше уведених в експлуатацію двох аналогічних КС СГВв 315-20/0,5-24 У1 (рис. 3.42) на нафтогазовому родовищі «Кенлик» (рис. 3.43, табл. 3.5) у Республіці Казахстан, де вони подають попутний газ на електростанцію ЕГ-6000 виробництва «Мотор Січ», АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» у 3-му кварталі 2012 р. після усунення зауважень за результатами введення в експлуатацію та модернізації розпочало серійне виробництво КС СГВ 315-20/0,5-25 У1.

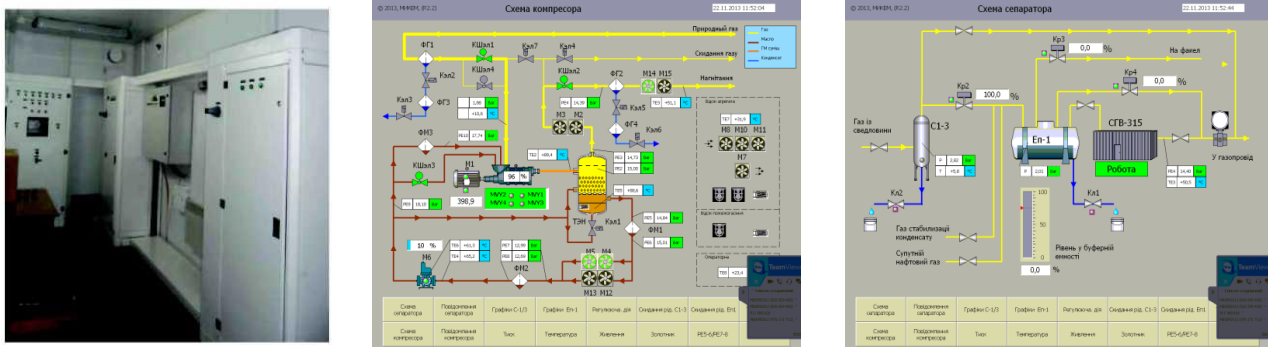


Рисунок 3.40 – Операторна та скриншоти екрана контролера керування станцією і комп'ютера віддаленого, безпроводного моніторингу



Рисунок 3.41 – Зовнішній вигляд СГВв 315-20/0,5-25 У1



Рисунок 3.42 – Зовнішній вигляд газових гвинтових станцій СГВв 315-20/0,5-24 У 1



Рисунок 3.43 – Газотурбінні електростанції АТ «Мотор Січ» на родовищі «Кенлик» у Республіці Казахстан

Нетривала експлуатація КС СГВ на нафтогазових родовищах України і Казахстану показала універсальність можливості їхньої роботи при зміні тиску подаваного газу від 0,05 до 0,4 МПа (0,5 до 4 бар) на всмоктуванні компресора, при тиску нагнітання в межах 1,6–2,5 МПа (16–25 бар) із підтриманням постійної продуктивності, а за необхідності зі зміною її від 100 до 10 % без перевищення потужності встановленого електропривода 315 кВт.

Сьогодні є потреба в КС, які застосовні в більш широкому діапазоні тисків газу на всмоктуванні КС до 1,2 МПа (12 бар) зі збереженням параметрів газу на виході КС щодо тиску до 2,5 МПа (25 бар) і продуктивності від 20 до 100 тис. нм куб., і в збільшенні тиску газу, що перекачується, до 3,5 МПа (35 бар) і вище при збільшенні продуктивності до 150 нм куб. на добу. ТОВ «МІКЕМ» разом із АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» розпочали модернізацію КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 і до кінця 2012 р. закінчили її.

Таблиця 3.5 – Технічні параметри дотискних гвинтових компресорних станцій паливного газу типу СГВ для живлення газотурбінних електростанцій

Робоче (стисливе) середовище		Газ природний за ДСТ
Об'ємна продуктивність	м ³ /хв	9
Тиск газу початковий (надлишковий)	МПа (кгс/см ²)	0,2(2)
Тиск газу кінцевий (надлишковий)	МПа (кгс/см ²)	1,2(12)
Температура газу початкова	°С	-5–+35
Температура газу кінцева	°С	не більше +60
Габаритні розміри установки	мм	6 060 x 2 440 x 2 600
Потужність електродвигуна	кВт	55
Маса станції	кг	9 000
Шафа ПЛК, змонтована в окремому відсіку компресорного блока (вхід із торця)		

Уведена опція щодо встановлення на СГВв 315-20/0,5-25 У1 того самого гвинтового компресора, але з різними внутрішніми ступенями стискання: 2; 2,2; 2,6; 3,6; 4,8; 5,5 під оптимальне співвідношення тиску нагнітання і всмоктування. Це дозволило КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 працювати при тиску всмоктування до 1,2 МПа (12 бар) і вище.

Дозволена заміна на КС СГВ 315-20/0,5-25 У1 компресорного блока (КБ) «СТ» (max P_{нагл} = 2,8 МПа (28 бар) на КБ «SP» (max P_{Кaal} = 5,2 МПа (52 бар) для перекачування газу в одному ступені або компресорному блоці іншої марки, що дасть можливість збільшити тиск на КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 до 3,5 МПа (35 бар).

Оскільки пристрій плавного запуску КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 допускає збільшення пускових струмів електродвигуна при 380 В до 3-кратних від номінального, що може викликати на деяких УКПГ відімкнення живлення, передбачена заміна його на керування запуском і роботою КС частотним перетворювачем.

У кінцевому підсумку перелічені конструктивні зміни дозволяють збільшити продуктивність КС СГВв 315-20/0,5-25 У до 150 тис. нм куб. за 1 добу. Для реалізації цієї можливості збільшений майже удвічі вбудований у масло-

віддільник фільтр-сепаратор очищення газу від масла (рис. 3.44, табл. 3.6). Залежно від параметрів газу передбачене збільшення фільтрів-сепараторів газу всмоктувальних і нагнітальних ліній.

Таблиця 3.6 – Характеристика фільтра-сепаратора до та після модернізації

Номер моделі	Витрата газу, м ³ /хв	Живий переріз, см ²	Розмір, мм			
			d ₁	d ₂	d ₃	h
49 304 52 101	22	3 280	300	355	220	400
49 306 52 102	39	5 860	300	355	220	700

Для збільшення тривалості роботи КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 без зупинення на обслуговування установлені здвоєні фільтри маслосистеми (рис. 3.45).

Робота КС СГВв 315-20/0,5-25 У1 у широкому діапазоні тиску всмоктування (від 0,05 до 1 МПа (0,5 до 10 бар), тиску нагнітання (від 1,7 до 3,5 МПа (17 до 35 бар) і продуктивності, зокрема і при її регулюванні від 100 до 2 %, потрібна різна кількість подаваного масла в компресор від 50 до 350 літрів за 1 хвилину. Більша подача масла в компресор приводить до збільшення споживаної потужності і віднесення масла.

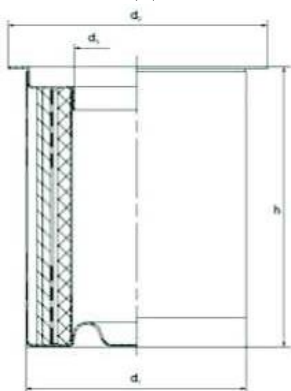


Рисунок 3.44 – Схема і загальний вигляд фільтра-сепаратора

Усі ці заходи передбачені без заміни потужності встановленого привода компресора (315 кВт, 380 В, 3000 об/хв) КС СГВв 315-20/0,5-25 У1.

До цього часу ТОВ «МІКЕМ» розробило, а АТ «НВАТ «ВНДІкомпресор-маш» виготовило і випробувало три дослідні зразки КС СГВ 400-65/4-26У1 (рис. 3.46) для живлення природним газом газової турбіни Siemens SGT-400. Їх промислова експлуатація відбувалася на Київському КБК (м. Обухів) з вересня 2012 року. Деякі з вищеперелічених заходів успішно застосовані на цих станціях.

У перспективі підприємства концерну «НІКМАС» могли б серійно виготовляти від 10 до 15 КС типу СГВв 315-20/0,5-25У1 за рік, що не задовольнить усі потреби в ДКС України, але істотно збільшить обсяг природного і попутного нафтового газу, що добувається в Україні.



Рисунок 3.45 – Здвосні масляні фільтри



Рисунок 3.46 – Зовнішній вигляд блокової дотискної компресорної станції СГВ 4-00-65/4-26 У1

3.3. Способи одержання і транспортування попутного нафтового газу за допомогою компресорних станцій СКГ

3.3.1. Станції на базі компресорів серії ГШ

Сьогодні на невеликих родовищах, віддалених від центральних пунктів підготовки нафти, попутний нафтовий газ спалюється на факелах, оскільки динаміка видобутку і його ресурси не дозволяють запропонувати технічно грамотного та економічно рентабельного рішення щодо його використання. При цьому необхідно відзначити, що попутний нафтовий газ є дорогою вуглеводневою сировиною, для утилізації якого й одночасно для поліпшення екологічної обстановки в районі родовищ необхідно вирішити завдання транспортування його до пунктів збирання або до споживачів газу.

Одним зі шляхів використання газу і поліпшення екологічної обстановки в районі родовищ є його транспортування до споживачів або пунктів збирання газу. Способи транспортування попутного нафтового газу з класифікацією технологічного устаткування наведені на рис. 3.47.

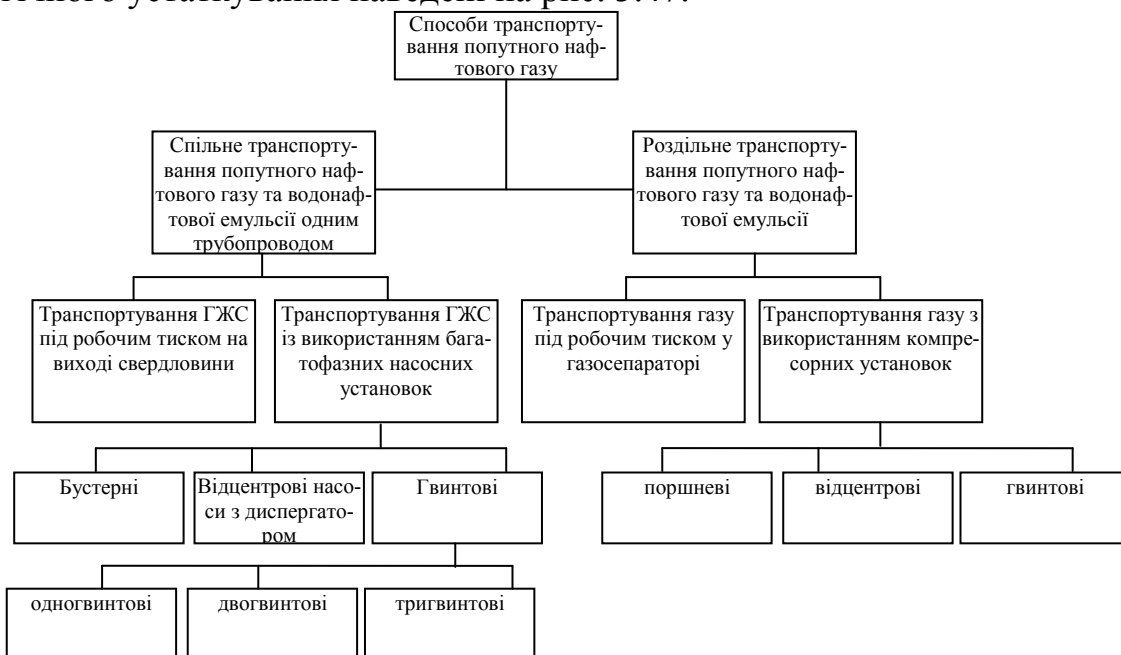


Рисунок 3.47 – Схема способів транспортування попутного нафтового газу

При роздільному транспортуванні попутного нафтового газу та водонафтової емульсії газ транспортується до нафтозбирального пункту газопроводом під робочим тиском газосепаратора, при недостатньому тиску – компресором. Для цього ТОВ «МІКЕМ» розробило компресорну станцію СКГ-127/6-12 УХЛ1, головним елементом якої є поршнева компресорна установка 6ГШ2.5-19/6-12С.

Станція компресорна газова СКГ-127/6-12 УХЛ1 (рис. 3.48) дозволяє одержувати попутний нафтовий газ тиском 12 кгс/см^2 , застосовуваний у технологічних процесах нафтогазовидобувної промисловості, а також для інших операцій. Станція працездатна за температури від -45 до $+400 \text{ }^\circ\text{C}$ і висоті над рівнем моря до 1 000 м.

Кліматичне виконання УХЛ1. Гарантійний термін експлуатації становить 12 місяців. Одиначний комплект ЗІП поставляється разом зі станцією (табл. 3.7). **Будова станції СКГ-127/6-12 УХЛ1:** поршнева компресорна установка 6ГШ2.5-19/6-12С, система керування, контейнер, технологічні трубопроводи, система пожежогасіння (рис. 3.49, табл. 3.8).



Рисунок 3.48 – Станція компресорна газова СКГ-127/6-12 УХЛ1



Рисунок 3.49 – Поршнева компресорна установка 6ГШ2.5-19/6-12С

Таблиця 3.7 – Структурна схема умовних позначень станції

Тип виконання «станція»	С
Пристрій для перекачування середовища – компресор	К
Для стискання газів (стисливе середовище)	Г
Об'ємна продуктивність за початкових номінальних умов, зведена для умов вимірювання $0 \text{ }^\circ\text{C}$ та $101\,325 \text{ Па}$, $\text{м}^3/\text{хв}$	127
Тиск газу початковий, мінімальний, кгс/см^2	6
Тиск газу кінцевий, номінальний, кгс/см^2	12
Кліматичне виконання і категорія розміщення за ДСТ 15150-69	УХЛ1

Таблиця 3.8 – Технічна характеристика компресора 6ГШ2.5-19/6-12С

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення або характеристика
Компресор	поршневий, газовий, 2 W-подібний, шестирядний, одноступінчастий, із повітряним охолодженням	

Продовження таблиця 3.8

Найменування параметра	Одиниця вимірювання	Значення або характеристика
Температура довкілля	$^{\circ}\text{C}$	+5—+40
Тиск газу початковий	$\text{кгс}/\text{см}^2$	6
Тиск газу кінцевий	$\text{кгс}/\text{см}^2$	13
Продуктивність, зведена до н. у.	$\text{нм}^3/\text{хв}$	$(127 \pm 5) \%$;
Потужність на валу компресора	не більше, кВт	230
Частота обертання	об/хв	980
Маса	кг не більше	2 500
Габарити компресора	мм не більше	1 600×22 00× ×2 000

Керування станцією та контроль робочих параметрів здійснюються за допомогою мікропроцесорної системи керування, розміщення виносного пульта визначається розміщенням операторського приміщення. У контейнері, що кріпиться на рамі, встановлена компресорна установка. Він являє собою зварений каркас, виконаний із листового профілю, підставкою якого є рама. На стійках каркаса кріпляться щити і двері. До верхньої рами каркаса кріпиться дах. Колінчастий вал має кілька ремонтних розмірів шатунних шийок, одержуваних шліфуванням. При цьому заміна вала не потрібна. Двигун з'єднується з компресором пружною муфтою з еластичним елементом. Картер компресора та фланець двигуна з'єднуються проміжним корпусом, що забезпечує центрування валів.

3.3.2. Серія СГВ із газопоршневим двигуном

Застосування електродвигуна як привода компресора не завжди є можливим через відсутність електропостачання компресорної установки (станції) на місці її експлуатації. Вирішити проблему вдається, застосувавши газопоршневий привід компресора. Газові двигуни «Caterpillar» і «Waukesha», які пропонуються замість електродвигунів, особливої презентації не потребують. Дві відомі американські компанії, лідери на світовому ринку двигунів внутрішнього згоряння, випускають ряд газопоршневих двигунів, спеціально сконструйованих для тяжких умов експлуатації як приводів компресорів. Такі двигуни довговічні й надійні, характеризуються ефективною витратою палива, чудовими перехідними характеристиками, низьким рівнем викидів і мають довгі міжремонтні інтервали. Діапазони потужностей, що розвиваються газопоршневими двигунами «Caterpillar» і «Waukesha», перебувають у межах від 70 до 2 000 кВт і вище, швидкостей – від 1 000 до 1 800 об/хв (рис. 3.50, 3.51).



Рисунок 3.50 – Газопоршневі двигуни «Caterpillar»

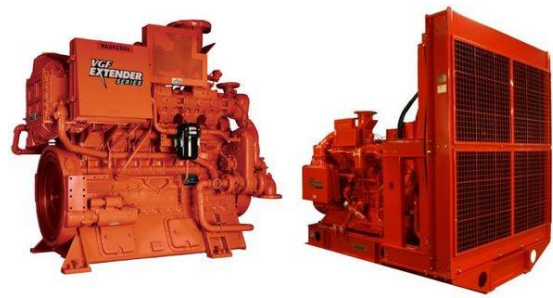


Рисунок 3.51 – Газопоршневі двигуни «Waukesha»

Для передачі крутного моменту від вала двигуна до вала компресора можливе установлення такого устаткування: муфти зчеплення (ручної або автоматичної – гідравлічної або пневматичної) – для роздільного від компресора прогрівання двигуна перед прийняттям ним навантаження, швидкого розчіплювання валів у разі аварійної ситуації та ін.; підвищувального редуктора (мультиплікатора) – для збільшення продуктивності компресора за рахунок збільшення частоти обертання (рис. 3.52, 3.53).

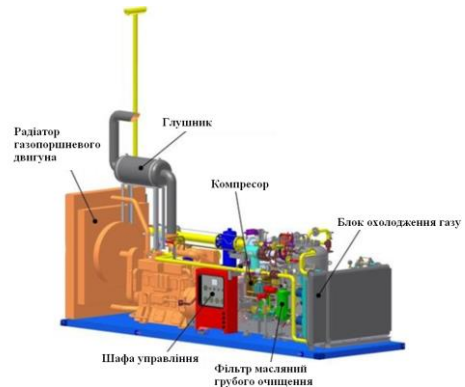
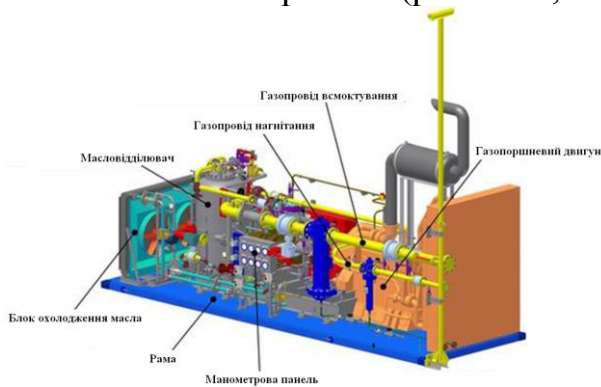


Рисунок 3.52 – Загальний вигляд газової КУ із газопоршневим приводом



Рисунок 3.53 – Загальний вигляд газової КС із газопоршневим приводом

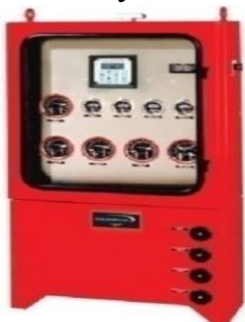


Рисунок 3.54 – Шафа автоматичного керування

Керування запуском, роботою та зупиненням компресорної установки (станції) здійснюється системою автоматичного керування «FW Murphy» (США) за допомогою сигналів датчиків (температури, тиску, рівня, положення та ін.), що передаються в шафу автоматичного керування (рис. 3.54). Дані, безперервно вимірювані на установці (станції), обробляються

мікропроцесорним контролером. Усі критичні значення реєструються і видаються операторові у вигляді сигналу попередження або тривоги, а при перевищенні цих значень компресорна установка (станція) автоматично зупиняється.

3.4. Підвищення надійності та ефективності буріння і ремонту нафтових та газових свердловин

3.4.1. Азотні станції для ремонту нафтових і газових свердловин великої глибини

Для ремонту нафтових і газових свердловин великої глибини застосовуються станції АМГП-17/25У1 для одержання з атмосферного повітря азоту з концентрацією 95 % під високим тиском (рис. 3.55, табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – Технічні параметри станції АМГП-17/25У1



Рисунок 3.55 – Загальний вигляд станції АМГП-17/25У1

Об'ємна продуктивність щодо азоту	м ³ /хв	17
Початковий тиск повітря (абсолютний)	МПа	0,1
Кінцевий тиск азоту	МПа	25
Концентрація азоту	%	95
Тип приводних двигунів компресорів		дизельний, 4-тактовий, рідинного охолодження із запаленням від стискання
Запуск двигуна		стартер
Система охолодження двигуна		рідинна, закритого типу з вимушеною циркуляцією охолодженої рідини
Кліматичне виконання		У1 за ДСТ 15150

Азот як інертний газ використовується для виконання технологічних операцій при бурінні, освоєнні і ремонті газових свердловин, розкритті продуктивних пластів, ремонті і випробуваннях трубопроводів, резервуарів та устаткування, що експлуатуються з вибухонебезпечними середовищами.

3.4.2. Буріння, розкриття продуктивних пластів та ремонт нафтових і газових свердловин із використанням високоефективних піногенеруючих пристроїв

Буріння нафтогазових свердловин у пористих і нестійких породах та розкриття нафтогазових пластів пов'язані зі значними труднощами, а саме: великим поглинанням бурового розчину, навіть до катастрофічного, та пов'язаними з цим значними витратами на постачання хімічних реагентів, приготуванням промивальних рідин, спусканням проміжних колон, тампонажними роботами та ін.; розмиванням буровим розчином нестійких порід, що не дозволяє одержати якісний керн для геологічних досліджень; виникненням у процесі буріння свер-

дловин ускладнень, пов'язаних із розмиванням стінок свердловин, каверноутвореннями, накопиченням на вибої шламу, прихоплюванням і заклинюванням бурового інструменту та ін.; при розкритті нафтогазоносних горизонтів можливе закупорювання буровим розчином продуктивного пласта і неотримання очікуваного ефекту.

Запобігти цим ускладненням можна шляхом використання як бурового розчину газорідних сумішей, що мають цілий ряд переваг порівняно з промивальними рідинами і дають можливість усунути вищеперелічені негативні явища. Газорідні суміші є дисперсними системами, що складаються з двох компонентів – газоподібного та рідкого (суміш води та різноманітних хімічних реагентів: поверхнево-активні речовини, інгібітори, стабілізатори та ін.).

Найбільш поширеними в нафтогазовій промисловості є аеровані рідини та піни. У нашому випадку розглядаються піни та обладнання, пов'язане з ними. При бурінні з промиванням вибою пінами порівняно з буровими розчинами збільшується механічна швидкість буріння в твердих породах (приблизно в 4 рази), є можливість запобігання поглинанню в пористих та тріщинуватих породах і кольматації проникних пластів. При розкритті та освоєнні продуктивних горизонтів продуктивність свердловини зростає в 1,5–2 рази з одночасним скороченням термінів освоєння в 4–5 разів. Швидкість потоку піни при якісному очищенні свердловини в 2 рази менша порівняно з водою промивальною рідиною і в 10 разів менша порівняно з повітрям або газом.

Використання відносно стабільної піни в Ірані виявило такі її переваги: покращання стійкості стінок свердловини; зменшення кількості прихоплень бурового інструменту; зменшення витрати доліт та зменшення потужностей. Процес піноутворення є складним, оскільки на утворення якісної піни впливають фізико-хімічні, фізико-технічні та інші фактори. Як правило, для одержання піни використовують піногенеруючі пристрої різних конструкцій та принципів дії. Всі існуючі пристрої можуть бути рекомендовані для буріння неглибоких геологорозвідувальних, геофізичних та свердловин іншого призначення.

Також відома сучасна інформація із доступних джерел, що на сьогодні в практиці буріння нафтогазових свердловин із піною відсутнє обладнання, що дозволяє формувати піну із певними заданими структурою та дисперсністю.

3.4.2.1. Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв шляхом створення дрібнодисперсної стійкої піни

3.4.2.1.1. Особливості механізму піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу

Сьогодні створено багато різних конструкцій піногенеруючих пристроїв. Для аналізу можливості процесів руху потоків рідини, газу (повітря) та піни зроблено структурні схеми, деяких із них наведено нижче .

Змішувач для аерації промивальної рідини і приготування піни буде мати таку структурну схему (рис. 3.56). У приймальну камеру 3 через сопло із насадкою 1 подається рідина, яка через отвори в соплі 2 засмоктує повітря із атмо-

сфери. У камері змішування 4 відбувається перемішування потоків рідини та повітря, і аерована рідина (піна) виходить через дифузор 5.

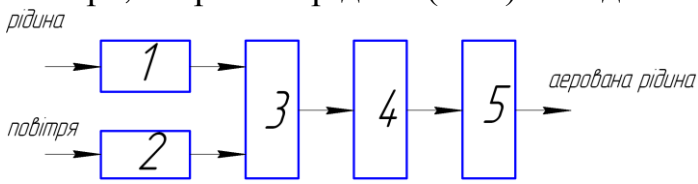


Рисунок 3.56 – Структурна схема змішувача для аерації промивальної рідини:
1 – сопло із насадкою; 2 – отвори в соплі; 3 – приймальна камера; 4 – камера змішування;
5 – дифузор

Конструктивною особливістю піногенеруючого пристрою є те, що на виході із камери піноутворення встановлені сітки з розміщеними в них кульками. Під час ударів об сферичну сітку кульки, підхоплені потоком, будуть здійснювати рух замкненим простором, ударяючись між собою, об стінки ежекційної вставки та сферичної сітки. Відділені від кульок мікрочастинки переходять у пінну суміш, підвищуючи якість створення піни. Структурна схема піногенеруючого пристрою подана на рис. 3.57.

У розглянутих типових конструкціях пристроїв піна утворюється на сітці або при потраплянні суміші в перфоровану трубку. Структурні схеми таких піногенеруючих пристроїв зображені на рис. 3.58.

Наступний піногенеруючий пристрій для приготування технічної піни має камеру диспергування, виконану у вигляді зрізаного конуса, що розширюється в напрямку руху піни, має встановлений по її осі глухий циліндр, з'єднаний зі стінками камери гвинтовою перегородкою. Наповнювач виготовлений із волокнистого пружного матеріалу, а патрубків для повітря і рідини сходяться у форсунці, встановленій на вході в камеру диспергування. На виході із цієї камери встановлена ґратка і видавальний пінопровід. Структурна схема цього пристрою показана на рис. 3.59. Особливістю існуючого піногенеруючого пристрою для освоєння свердловин є те, що суміш рідини з газом подається тангенціально виконаним каналом у вихрову камеру. Під дією відцентрових сил суміш розділяється на рідину біля стінок, яка виділяється з піногенеруючого пристрою через відвідний канал, і піну, що проходить через калібрувальні сітки і подається через вихідну трубу. Структурна схема такого піногенеруючого пристрою наведена на рис. 3.60.

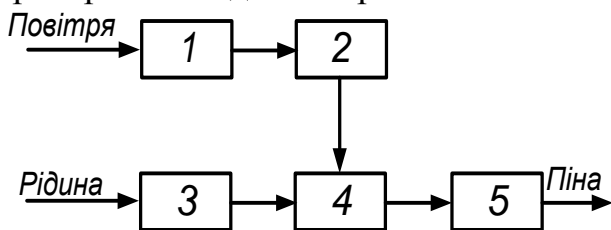


Рисунок 3.57 – Структурна схема піногенеруючого пристрою: 1 – циліндрична вставка; 2 – отвори дифузора;
3 – ежекційна вставка;
4 – камера піноутворення; 5 – сітки

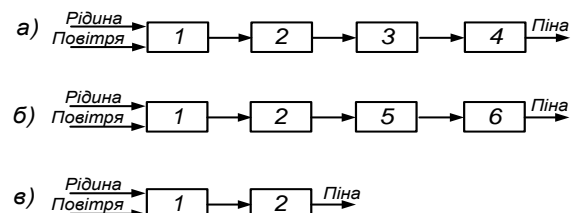


Рисунок 3.58 – Структурні схеми піногенеруючих пристроїв: 1 – камера змішування; 2, 4 – сітки; 3 – легкий сипкий матеріал; 5 – отвори трубки;
6 – перфорована трубка:
а) із використанням двох сіток і сипкого матеріалу; б) із використанням однієї сітки

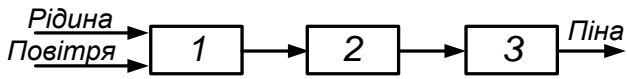


Рисунок 3.59 – Структурна схема піногенеруючого пристрою для технічної піни: 1 – форсунка; 2 – камера диспергування; 3 – ґратка

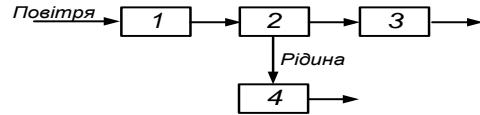


Рисунок 3.60 – Структурна схема піногенеруючого пристрою для освоєння свердловин: 1 – ежектор; 2 – вихрова камера; 3 – калібрувальні сітки; 4 – відвідний канал

Провівши структурний аналіз, можна дійти висновку, що для проектового піногенеруючого пристрою доцільно підібрати структурну схему, зображену на рис. 3.61.

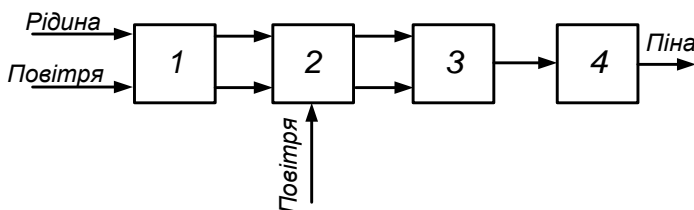


Рисунок 3.61 – Структурна схема проектового піногенеруючого пристрою: 1 – багатосоплова вставка; 2 – камера попереднього змішування; 3 – камера кінцевого змішування; 4 – дифузор

Запропонований піногенеруючий пристрій буде найбільш близьким до пристрою для насичення рідини повітрям або газом, під час роботи якого промивальна рідина подається до соплової вставки. Внаслідок великих швидкостей витікання рідини із сопла у камері змішування утворюється розрідження, і повітря із атмосфери компресора надходить у цю саму камеру, де відбувається процес змішування рідини з повітрям.

При великих подачах рідини односопловий пристрій є неефективним унаслідок незначної площі контакту рідини з повітрям. Наявність лише одного ступеня насичення рідини повітрям дає низьку якість насичення. Тому в'язка промивальна рідина в цьому пристрої не буде одержувати належного перемішування і диспергування суміші до піноутворення. Для підвищення ефективності піноутворення пропонується вдосконалити піногенеруючий пристрій шляхом збільшення ступенів насичення рідини повітрям (газом) та збільшення площі контакту зі струменями рідини за рахунок належного перемішування і диспергування суміші. Для цього камера змішування поділена на декілька ежекційних камер попереднього змішування, кожна з яких містить сопло і канал підведення повітря (газу), додатково введено камеру кінцевого змішування струменів, що виходять із камер попереднього змішування. Стабілізація потоку піни здійснюється в дифузорі, де зменшується швидкість руху потоку і зростає тиск.

Найкращими умовами для приготування піни є використання змішувача рідини й газу (піногенеруючого пристрою) у нагнітальній лінії насосно-циркуляційної системи біля бурового насоса і компресора. При цьому консистенцію піни можна регулювати зміною подачі повітря, витрати рідини і концентрації піноутворювача в промивальній рідині. Важливою властивістю піни є її дисперсність, яку можна оцінити середнім діаметром бульбашок, питомою поверхнею поділу «рідина – газ» або розподілом бульбашок за розмірами. Чим менший середній радіус бульбашок, тим більший ступінь монодисперсності піни і тим більша її стійкість. На дисперсність пін, крім фізико-хімічних властивостей (поверхневий натяг, в'язкість, концентрація поверхнево-активної речовини і т. д.), істотно впливають спосіб змішування фаз, конструкція піногенеруючого пристрою, а також режими ведення технологічного процесу.

Завдання визначення закономірностей, що пов'язують процеси піноутворення з властивостями рідини і повітря, параметрами їх руху, а також геометричними розмірами піногенеруючих пристроїв, досить складне. Тому на основі дещо спрощеної моделі пропонуються методи підбору параметрів потоків робочої рідини й ежектованого повітря, за яких можна було б досягнути найбільшої ефективності в процесі піноутворення.

У багатосопловому піногенеруючому пристрої із п'ятисопловою вставкою і окремим каналом для кожного сопла втрати напору на вході порівняно з односопловим збільшаться, проте стабільність роботи, однорідність та ступінь монодисперсності утвореної піни підвищаться. Очевидно, що основні процеси утворення піни будуть відбуватися в камері змішування кожного каналу, а їх кількість визначає в основному лише продуктивність піногенеруючого пристрою. Тому обмежимося розглядом робочого процесу утворення піни, що відбувається в одному з каналів піногенеруючого пристрою. Аналіз будемо проводити на основі схем пристрою ежекційного типу і розподілу статичного тиску за його довжиною, наведених на рис. 3.62. У них показано, що на зрізі сопла статичний тиск зменшується від початкового p_1 до сталого p_2 аж до зони стиснення. Факт зниження тиску в зоні змішування чітко спостерігався в багатьох експериментах різних учених. Це зниження можна пояснити рухом повітряної фази, що захоплюється струменем робочої рідини. Його величина наближено дорівнює величині динамічного тиску рухомого повітря (газу).

Розрахунки параметрів у камері змішування піногенеруючого пристрою будемо проводити за такими припущеннями: повітряний потік не містить вологи, а потік рідини не містить бульбашок; довжина початкової й основної ділянок відома; статичний тиск сталий у кожній точці перерізу; стрибок ущільнення відбувається в камері змішування; параметри суміші в будь-якому перерізі до і після стрибка ущільнення підлягають рівнянню імпульсів; стискання газу в стрибку ізотермічне; процес змішування до стрибка ущільнення ізобаричний і статичний тиск обумовлений лише газовою фазою; теплообмін із навколишнім середовищем відсутній; рідина нестислива і газ у ній нерозчинний.

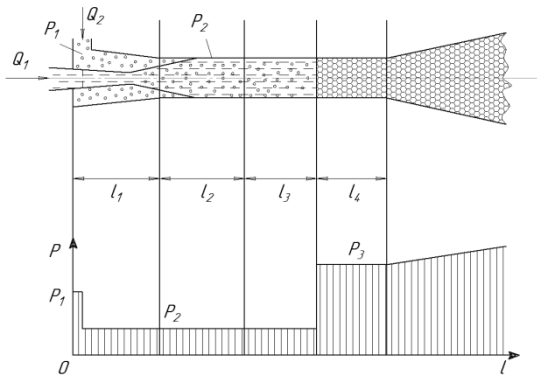


Рисунок 4.62 – Схеми пристрою ежекційного типу і розподілу статичного тиску по його довжині

Уведемо такі позначення: Q_1 і Q_2 – об’ємні витрати рідини і повітря відповідно; u – ступінь аерації дорівнює Q_2/Q_1 ; v_p – швидкість рідини на виході із сопла; v_2 і v_3 – швидкості суміші до і після стрибка ущільнення відповідно; p_1, p_2 і p_3 – статичні тиски поблизу сопла до і після стрибка ущільнення відповідно; p_0 – атмосферний тиск; P_1 – повний тиск рідини перед соплом; ΔP_1 – перепад тиску на соплі дорівнює $P_1 - p_1$; Γ – геометричний параметр, дорівнює F_3/F ; де F_3 і F – площі перерізів камери змішування і рідинного сопла; ϕ – коефіцієнт швидкості сопла.

Під час розрахунку пристрою ежекційного типу будемо виходити з балансу енергії та враховувати всі істотні втрати в пристрої, що відповідають кожній його ділянці: $\Delta P_{тр1}$ – втрата тиску на тертя на початковій ділянці l_1 ; $\Delta P_{тр2}$ – втрата тиску на тертя на основній ділянці l_2 ; $\Delta P_{тр3}$ – втрата тиску на тертя на ділянці l_3 до стрибка; $\Delta P_{тр4}$ – втрата тиску на тертя на ділянці l_4 після стрибка; ΔE_2 – енергія, що витрачається на утворення крапель із одиниці об’єму рідини на основній ділянці; ΔE_3 – енергія, що витрачається на створення вільної поверхні рідини при утворенні бульбашок у зоні стрибка або безпосередньо після нього.

Із аналізу великої кількості експериментальних даних, наведених у працях різних авторів, течію в пристрої ежекційного типу можна поділити на чотири ділянки. На початковій ділянці l_1 зберігається суцільність струменя робочого рідинного потоку. В цій зоні відбувається роздільна течія рідинної та газової фаз. Швидкість рідини в ядрі стала і дорівнює швидкості витікання із сопла. Але поступово, за рахунок турбулентних поперечних пульсацій швидкості, що викликають розсіювання рідини в поперечному напрямку та аерацію струменя повітрям, відбувається її розпад на повітряно-краплинну суміш. У кінці початкової ділянки ядро сталої швидкості зникає, і розширення струменя супроводжується падінням швидкості на осі ежектора. В цьому місці починається основна ділянка l_2 . Уздовж неї відбувається формування повітряно-краплинного однорідного потоку. Течія вільного струменя на початковій і основній ділянках відбувається при сталому статичному тиску як уздовж течії, так і в її поперечних перерізах.

Третя ділянка l_3 починається від місця завершення формування повітряно-краплинної однорідної суміші до стрибка ущільнення, що супроводжується перетворенням повітряно-краплинної суміші в рідинно-пухирцеву, при якій пухирці повітря мають приблизно однаковий діаметр і розділені плівками рідини. Стрибок ущільнення характеризується різким підвищенням тиску. Далі двофазний потік буде рухатися у вигляді пінної структури. Для отримання стрибка ущільнення необхідно, щоб швидкість повітряно-краплинного потоку перевищувала швидкість звуку в ньому. На четвертій ділянці l_4 , що починається за стрибком ущільнення, суміш рухається як двофазний однорідний бульбашково-пінний потік.

Дослідження швидкості звуку у водоповітряній суміші проводилися залежно від об'ємної газомісткості. Зокрема, наведено графік (рис. 3.63), на якому проілюстрована якісна картина зміни швидкості звуку у водоповітряній суміші залежно від об'ємної газомісткості.

Із графіка видно, що швидкість звуку в суміші найбільше змінюється при вмісті газу 0–20 % та 80–100 %. При вмісті газу 20–80 % значення швидкості звуку змінюється незначно, а мінімум швидкості звуку знаходиться при вмісті газу 50 % і становить 20,1 м/с.

Довжина початкової ділянки в загальному випадку визначається трьома основними критеріями: числом Вебера, знайденим за відносною швидкістю фаз, початковим діаметром рідинного струменя і густиною газу, критерієм Лапласа, що характеризує в'язкість та поверхневий натяг рідини, відношенням густини газу до густини рідини. В літературних джерелах наведена велика кількість експериментальних залежностей для відносної початкової ділянки, але найкращий збіг із дослідними даними дає рівняння Лишевського:

$$\frac{l}{d} = 50,3 \cdot We^{-0,83} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} \right)^{0,5} \cdot Lp^{-0,096}, \quad (3.1)$$

де $We = \frac{\rho_z \cdot d \cdot (v_p - v_z)^2}{\sigma}$ – число Вебера; $Lp = \frac{\rho_p \cdot d \cdot \sigma}{\mu_p^2}$ – критерій Лапласа;

d – діаметр ежекційної камери; ρ_p, ρ_z – відповідно густина рідини та повітря; σ, μ_p – поверхневий натяг та в'язкість рідини.

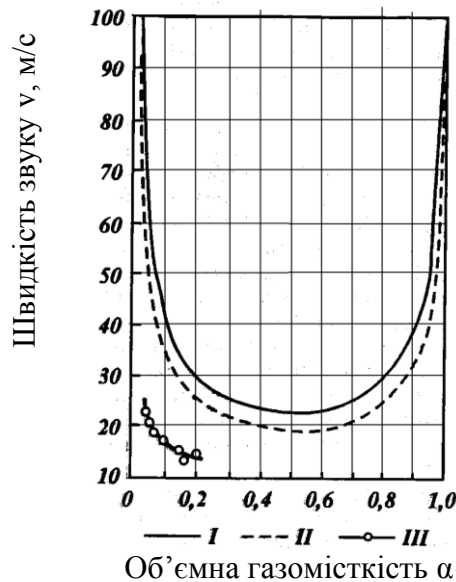


Рисунок 3.63 – Швидкість звуку у водоповітряній суміші:

- I – розрахункові значення при адіабатному процесі;
- II – розрахункові значення при ізотермічному процесі;
- III – експериментальні значення на дрібнодисперсних сумішах

Відносну довжину основної ділянки за даними можна визначити з експериментальної залежності Мігеля:

$$\frac{l}{D} = 18,36 \cdot M_R^{-0,181}, \quad (3.2)$$

де $M_R = \frac{\rho_p \cdot v_p}{\rho_2 \cdot v_2}$ – коефіцієнт відношення добутоків густини та швидкості

рідини до густини та швидкості газу; D – діаметр камери змішування.

Рівняння балансу енергії для i -го перерізу пристрою ежекційного типу буде мати вигляд

$$\frac{\rho_p \cdot v_p^2}{2} + p_1 = \frac{\rho_i \cdot v_i^2}{2} + p_i + u \cdot p_1 \cdot \tau \cdot \ln \frac{p_i}{p_2} + \Delta P_{mpi} + \Delta E_i, \quad (3.3)$$

де v_i , ρ_i , p_i – швидкість, густина, статичний тиск суміші в i -му перерізі; τ – відношення абсолютної температури газу в зоні стрибка T_2 до температури його в приймальній камері T_1 , що характеризує ізобаричну зміну температури газу до стрибка ущільнення.

Швидкість суміші за відсутності ковзання фаз і з урахуванням того, що стискання ізотермічне, можна вивести із рівняння об'ємної витрати

$$v_i = \frac{Q_1 + \frac{p_1}{p_i} \cdot Q_2}{F_3}. \quad (3.4)$$

Оскільки $Q_1 = Q_2/u = v_p F$, то після нескладних перетворень одержимо

$$v_i = \left(1 + \frac{p_1}{p_i} \cdot u \right) \cdot \frac{v_p}{\Gamma}. \quad (3.5)$$

Швидкість v_p на виході сопла можна визначити через перепад тиску на соплі ΔP_1 та коефіцієнт швидкості сопла φ із рівняння

$$\frac{\rho_p \cdot v_p^2}{2} = \varphi^2 \cdot \Delta P_1. \quad (3.6)$$

Середню густину суміші можна виразити як функцію від об'ємної газомісткості α або як функцію від масової газомісткості x . Для однорідного стаціонарного потоку за рівності швидкостей фаз об'ємна і масова газомісткість відповідно дорівнюють:

$$\alpha = \frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{Q_2}{Q}, \quad x = \frac{W_2}{W_1 + W_2} = \frac{W_2}{W}, \quad (3.7)$$

де Q_1 , Q_2 , Q – об'ємні витрати рідини, газу і суміші; W_1 , W_2 , W – масові витрати рідини, газу і суміші в деякому перерізі потоку.

Тоді середня густина суміші в цьому перерізі як функція об'ємної газомісткості запишеться у вигляді

$$\rho = \frac{W}{Q} = \alpha \cdot \rho_2 + (1 - \alpha) \cdot \rho_p, \quad (3.8)$$

а як функція від масової газомісткості буде задовольняти рівняння

$$\frac{1}{\rho} = \frac{x}{\rho_2} + \frac{1-x}{\rho_p}, \quad (3.9)$$

де ρ_p, ρ_2 – густина рідинної і газової фаз у заданому перерізі.

Із рівнянь (3.8) і (3.9) можна встановити зв'язок між масовим та об'ємним вмістом газу в суміші:

$$x = \frac{\alpha \cdot \rho_2}{\alpha \cdot \rho_2 + (1-\alpha) \cdot \rho_p}. \quad (3.10)$$

У рівнянні балансу (3.3) невідомими є статичний тиск p_3 , а також швидкість суміші v_3 та об'ємна газомісткість α_2 після стрибка ущільнення. Для знаходження цих параметрів використаємо рівняння неперервності, яке в нашому випадку має вигляд

$$\rho_1 \cdot v_2 = \rho_2 \cdot v_3, \quad (3.11)$$

рівняння збереження кількості руху

$$\rho_1 \cdot v_2^2 + p_2 = \rho_2 \cdot v_3^2 + p_3 \quad (3.12)$$

і рівняння збереження енергії

$$\left(i_{p1} + \frac{v_2^2}{2} \right) \cdot (1-x) + \left(i_{e1} + \frac{v_2^2}{2} \right) \cdot x = \left(i_{p2} + \frac{v_3^2}{2} \right) \cdot (1-x) + \left(i_{e2} + \frac{v_3^2}{2} \right) \cdot x, \quad (3.13)$$

де ρ_1, v_2, p_2 – густина, швидкість і статичний тиск краплинної суміші перед стрибком ущільнення; ρ_2, v_3, p_3 – густина, швидкість і статичний тиск бульбашкової суміші за стрибком ущільнення; i_{p1}, i_{e1} – ентальпії рідини і газу перед стрибком ущільнення; i_{p2}, i_{e2} – ентальпії рідини і газу за стрибком ущільнення.

Із достатнім ступенем точності, припустивши, що ентальпія рідини в стрибку не змінюється ($i_{p1} = i_{p2}$), і використавши вираз для ентальпії газу

$$i_e = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p}{\rho}, \quad (3.14)$$

зведемо рівняння енергії до вигляду

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_2}{\rho_{e2}} \cdot x + \frac{v_2^2}{2} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{p_3}{\rho_{e3}} \cdot x + \frac{v_3^2}{2}. \quad (3.15)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3.11), (3.12) і (3.5) з урахуванням того, що згідно з рівняннями (3.8) і (3.9):

$$\rho_1 = \rho_p \cdot \frac{1-\alpha_1}{1-x}, \quad \rho_2 = \rho_p \cdot \frac{1-\alpha_2}{1-x}, \quad \rho_{e2} = \left(\frac{1}{\alpha_1} - 1 \right) \cdot \rho_p \cdot \frac{x}{1-x} \quad \text{і} \quad \rho_{e3} = \left(\frac{1}{\alpha_2} - 1 \right) \cdot \rho_p \cdot \frac{x}{1-x},$$

одержимо вирази для параметрів потоку за стрибком ущільнення через параметри потоку перед ним:

$$p_3 = p_2 + (1-\alpha_1) \cdot \rho_p \cdot v_2^2 \cdot \left(1 - \frac{\xi^{-1} + (1-\alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma-1} - 1 \right)}{\alpha_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma-1} - 1 \right)} \right), \quad (3.16)$$

$$v_3 = v_2 \cdot \frac{\xi^{-1} + (1 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma - 1} - 1 \right)}{\alpha_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} - 1 \right)}, \quad (3.17)$$

$$\alpha_2 = \frac{1 - \xi \cdot (1 - \alpha_1)^2}{1 + \xi \cdot (1 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma - 1} - 1 \right)}, \quad (3.18)$$

де

$$\xi = \left(1 + \frac{1}{v_2^2} \cdot \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_2 \cdot \alpha_1}{(1 - \gamma) \cdot \rho_p} \right)^{-1}. \quad (3.19)$$

Використавши відомий вираз для швидкості звуку у двофазному середовищі за відсутності фазових змін

$$a = \left(\frac{n \cdot p}{\alpha \cdot (1 - \alpha) \cdot \rho_p} \right)^{0.5}, \quad (3.20)$$

запишемо формулу для числа Маха набігаючого краплинного потоку перед стрибком ущільнення:

$$M_1 = v_2 \cdot \left(\frac{n \cdot p_2}{\alpha_1 \cdot (1 - \alpha_1) \cdot \rho_p} \right)^{-0.5}. \quad (3.21)$$

Урахувавши рівняння (3.21), систему рівнянь (3.16)–(3.19) можна звести до безрозмірної системи для визначення відносних змін параметрів руху:

$$\frac{p_3}{p_2} = 1 + \frac{M_1^2 \cdot n}{\alpha_1} \cdot \left(1 - \frac{\xi^{-1} + (1 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma - 1} - 1 \right)}{\alpha_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} - 1 \right)} \right), \quad (3.22)$$

$$\frac{v_3}{v_2} = \frac{\xi^{-1} + (1 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma - 1} - 1 \right)}{\alpha_1 \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} - 1 \right)}, \quad (3.23)$$

$$\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{1 - \xi \cdot (1 - \alpha_1)^2}{\alpha_1 + \xi \cdot \alpha_1 \cdot (1 - \alpha_1) \cdot \left(\frac{2 \cdot \gamma \cdot \alpha_1}{\gamma - 1} - 1 \right)}, \quad (3.24)$$

де

$$\xi = \left(1 + \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{\alpha_1^2}{n \cdot M_1^2} \right)^{-1}, \quad (3.25)$$

n – показник політропи, що визначає теплообмін між фазами. Якщо вміст газової фази в потоці та швидкість потоку великі, тоді показник політропи потрібно брати таким, що дорівнює показнику адіабати $n = \gamma$. Якщо вміст газової

фази невеликий, а теплообмін між фазами настільки великий, що газ перебуває в тепловій рівновазі з рідиною, то $n = 1$.

Із рівнянь (3.22)–(3.25) бачимо, що відносні параметри потоку суміші за стрибком ущільнення залежать від числа Маха M_I набігаючого потоку і об'ємної газомісткості α_1 перед стрибком, яка, у свою чергу, визначається ступенем аерації u .

Для того, щоб можна було проводити розрахунки за наведеними вище рівняннями, необхідно доповнити їх рівняннями для визначення параметрів руху перед стрибком:

$$\alpha_1 = \frac{u}{\frac{p_2}{p_1} + u}; \quad v_2 = \left(1 + \frac{p_1}{p_2} \cdot u\right) \cdot \frac{v_p}{\Gamma}. \quad (3.26)$$

У цих рівняннях p_2 можна визначити із тих міркувань, що зниження статичного тиску $\Delta p = p_1 - p_2$ обумовлене рухом газу (повітря), захопленого струменем рідини, і приблизно дорівнює величині його динамічного тиску

$$\Delta p = \frac{\rho_2 \cdot v_2^2}{2}, \quad (3.27)$$

де швидкість газу

$$v_2 = \frac{Q_2}{F_3 - F} = \frac{u \cdot v_p}{\Gamma - 1}. \quad (3.28)$$

Виразивши густину газу, що надходить у приймальну камеру, через тиск p_1 і температуру T_1 , згідно з рівнянням

$$\rho_2 = \frac{p_1}{R \cdot T_1} \quad (3.29)$$

для статичного тиску p_2 у камері змішування до стрибка одержимо вираз

$$p_2 = p_1 \cdot \left(1 - \frac{u^2 \cdot v_p^2}{R \cdot T_1 \cdot (\Gamma - 1)^2}\right), \quad (3.30)$$

де R – газова стала для повітря.

Оцінимо величину енергії ΔE_2 , яку необхідно витратити для того, щоб розділити одиницю об'єму рідини на N однакових краплин радіусом r_κ :

$$\Delta E_2 = N \cdot 4\pi \cdot r_\kappa^2 \cdot \sigma, \quad (3.31)$$

але

$$N = \frac{1}{\frac{4}{3}\pi r_\kappa^3}, \quad (3.32)$$

тоді

$$\Delta E_2 = \frac{3 \cdot \sigma}{r_\kappa}. \quad (3.33)$$

Аналогічно можна оцінити енергію ΔE_3 , необхідну для створення N однакових бульбашок радіусом r_δ в одиниці об'єму робочої рідини:

$$\Delta E_3 = \frac{3 \cdot \sigma}{r_0} \cdot \frac{\alpha_2}{1 - \alpha_2}, \quad (3.34)$$

де α_2 – об’ємна газомісткість суміші за стрибком;
 σ – поверхневий натяг робочої рідини.

Отже, із формул (3.33) і (3.34) бачимо, що для створення дрібнодисперсних повітряно-краплинних та рідинно-бульбашкових сумішей необхідна енергія, величина якої обернено пропорційна середньому радіусу краплі чи бульбашки. Причому енергія на створення бульбашкового потоку при великих значеннях об’ємної газомісткості може бути набагато більшою від енергії на створення краплинного потоку.

На початковій ділянці, довжина якої l_1 визначається експериментальним рівнянням (3.1), потік рідини і охоплюючий його потік повітря рухаються з різними швидкостями. Швидкість рідини на всій ділянці стала і дорівнює швидкості на виході сопла v_p , а швидкість інжектowanego газу (повітря) v_z можна вважати наближеною до сталої і визначати за формулою (3.28).

Силу тертя на поверхні поділу фаз щодо одиниці об’єму рідини будемо обчислювати за формулою

$$F_{mp} = \frac{2 \cdot C_{f1} \cdot \rho_z \cdot (v_p - v_z)^2}{d(z)}, \quad (3.35)$$

де $d(z)$ – діаметр струменя рідини залежно від відстані до сопла;

C_{f1} – коефіцієнт опору на межі поділу фаз.

Коефіцієнт опору в цій зоні залежить від числа Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{\rho_z \cdot (v_p - v_z) \cdot d(z)}{\mu_z} \quad (3.36)$$

і при ламінарній течії ($Re_1 < 5 \cdot 10^5$) визначається за формулою Блазіуса:

$$C_{f1} = 1,328 \cdot Re_1^{-0,5}, \quad (3.37)$$

а при турбулентній течії ($Re_1 > 5 \cdot 10^5$) визначається за формулою

$$C_{f1} = 0,0576 \cdot Re_1^{-0,2}. \quad (3.38)$$

Втратами під час руху повітряного потоку на стінці нехтуємо, оскільки вони незначні.

Досліди показують, що динамічний тиск струменя рідини у міру віддалення від сопла не змінюється, але діаметр зменшується. З іншого боку, відносна швидкість фаз теж зменшується. Характер цих змін складно визначити, тому при розрахунках будемо вважати, що на всій довжині зони діаметр струменя сталий $d(z) = d$ і відносна швидкість фаз теж не змінюється.

Тоді втрату тиску на опір на початковій ділянці визначимо за формулою

$$\Delta P_{mp1} = F_{mp} \cdot l_1. \quad (3.39)$$

На основній ділянці, довжина l_2 якої визначається за експериментальним рівнянням (3.2), унаслідок інтенсивного турбулентного перемішування фаз відбувається формування однорідного повітряно-краплинного потоку. На по-

чатку цієї ділянки газомісткість на осі ежектора буде близькою до нуля, а поблизу стінки камери змішування – близькою до одиниці. У міру віддалення течією газомісткість поблизу стінки зменшується, а на осі збільшується, і в кінці ділянки вони зрівнюються, що свідчить про формування однорідного повітряно-краплинного потоку. Швидкості рідинної і газової фаз однакові. Основну частину втрат повного тиску тут становить втрата енергії на утворення крапель, яка набагато більша від втрат на тертя повітряної фази на стінці камери змішування і втрат на тертя між фазами, оскільки їх відносна швидкість незначна і наближається до нуля. Тому втратами тиску на тертя на основній ділянці камери змішування нехтуємо ($\Delta P_{mp2} = 0$).

На ділянці довжиною l_3 до стрибка ущільнення і ділянці довжиною l_4 після стрибка двокомпонентна рідинно-газова суміш рухається у вигляді однорідної краплинно-повітряної і рідинно-бульбашкової (пінистої) суміші відповідно. Тому для визначення втрати тиску на тертя на цих ділянках застосуємо єдиний підхід із тією лише різницею, що при обчисленні коефіцієнта динамічної в'язкості суміші врахуємо, що краплинно-повітряна суміш ближча до газової фази, а піниста суміш ближча до рідинної фази.

Швидкість втрати тиску на тертя вздовж осі потоку дорівнює

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp} = \frac{\chi}{F_3} \cdot \tau, \quad (3.40)$$

де $\chi = \pi D$ – периметр камери змішування;

$F_3 = \frac{1}{4} \cdot \pi D^2$ – площа камери змішування; τ – середня дотична напруга на

стінці камери змішування, яку можна виразити через коефіцієнт тертя, густину і швидкість суміші згідно із формулою

$$\tau = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho \cdot v^2. \quad (3.41)$$

Підставивши (3.41) в (3.40), для градієнта тиску, обумовленого силами тертя, будемо мати

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp} = \frac{2 \cdot C_f \cdot G^2}{D \cdot \rho}, \quad (3.42)$$

де $G = \rho \cdot v$ – густина потоку суміші (масова швидкість).

Скориставшись формулою (3.9), густину суміші в (3.42) можна виразити через густини компонентів і масову газомісткість. Тоді одержимо

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp} = \frac{2 \cdot C_f \cdot G^2}{D} \cdot \left(\frac{1}{\rho_p} + x \cdot \left(\frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_p} \right) \right). \quad (3.43)$$

Оскільки детальна структура двофазного потоку невідома і неможливо визначити ідеалізовану реологічну модель течії, багато авторів досліджень беруть деяке еквівалентне середнє значення динамічної в'язкості, яке б задовольняло граничні випадки, коли відсутня одна із фаз. Ми скористаємося співвідношенням, запропонованим Макадамсом:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_z} + \frac{1-x}{\mu_p}. \quad (3.44)$$

Доцільно встановити співвідношення між в'язкістю, коефіцієнтом тертя і втратами тиску на тертя для двофазного потоку і для однієї із розглянутих фаз.

Якщо позначити індексом z випадок, коли по трубі тече газ з тією самою масовою швидкістю, що і при сумісній течії фаз, то із співвідношення

$$\frac{\mu}{\mu_z} = \frac{C_f}{C_{fz}}, \quad (3.45)$$

і формули (3.44) для двофазного потоку на ділянці l_3 одержимо

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{мрз}} = \Phi_z^2 \cdot \left(\frac{dp}{dz}\right)_{\text{мрз}} = \Phi_z^2 \cdot \frac{2 \cdot C_{fz} \cdot G^2}{D \cdot \rho_z}, \quad (3.46)$$

де C_{fz} – коефіцієнт тертя для газової фази;

$G = \rho_l v_2$ – масова швидкість суміші;

Φ_z^2 – коефіцієнт двофазності щодо чисто газового потоку, який для ламінарної течії дорівнює

$$\Phi_z^2 = \left(\frac{\mu_z}{\mu_p} + x \cdot \left(1 - \frac{\mu_z}{\mu_p} \right) \right) \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} + x \cdot \left(1 - \frac{\rho_z}{\rho_p} \right) \right). \quad (3.47)$$

У випадку турбулентної течії, використавши співвідношення (3.44) для еквівалентної в'язкості повітряно-краплинної суміші, визначаємо число Рейнольдса

$$Re = \frac{G \cdot D}{\mu} \quad (3.48)$$

і, використовуюючи рівняння Блазіуса 1-го роду для течії в гладких трубах, яке має вигляд

$$C_f = 0,079 \cdot Re^{-0,25}, \quad (3.49)$$

одержимо вираз для коефіцієнта двофазності

$$\Phi_z^2 = \left(\frac{\mu_z}{\mu_p} + x \cdot \left(1 - \frac{\mu_z}{\mu_p} \right) \right)^{-0,25} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_p} + x \cdot \left(1 - \frac{\rho_z}{\rho_p} \right) \right). \quad (3.50)$$

У формулах (3.46)–(3.50) необхідно всі величини, що залежать від тиску, брати при тиску p_2 .

Для пінистого потоку після стрибка ущільнення установимо співвідношення між в'язкістю, коефіцієнтом тертя і втратами тиску на тертя щодо рідинної фази. Тоді за аналогією із попередніми розрахунками, позначивши індексом p випадок, коли камерою змішування тече рідина з тією самою масовою швидкістю, що і суміш, швидкість втрати тиску на тертя на ділянці l_4 після стрибка

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp4} = \Phi_p^2 \cdot \left(\frac{dp}{dz}\right)_{mpp} = \Phi_p^2 \cdot \frac{2 \cdot C_{fp} \cdot G^2}{D \cdot \rho_p}, \quad (3.51)$$

де коефіцієнт двофазності щодо рідинного потоку для ламінарної течії

$$\Phi_p^2 = \left(1 + x \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_2} - 1\right)\right) \cdot \left(1 + x \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_2} - 1\right)\right), \quad (3.52)$$

а для турбулентної течії

$$\Phi_p^2 = \left(1 + x \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_2} - 1\right)\right)^{-0,25} \cdot \left(1 + x \cdot \left(\frac{\rho_p}{\rho_2} - 1\right)\right). \quad (3.53)$$

Тут у рівняннях (3.51)–(3.53) всі залежні від тиску величини потрібно брати при тиску p_3 .

Оскільки, як видно із аналізу вищенаведених формул, градієнти тиску сталі на тих ділянках, для яких вони визначені, а втрати тиску на цих ділянках відповідно будуть дорівнювати

$$\Delta P_{mp3} = l_3 \cdot \left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp3} \quad \text{і} \quad \Delta P_{mp4} = l_4 \cdot \left(\frac{dp}{dz}\right)_{mp4}. \quad (3.54)$$

Таким чином, розвинена вище теорія дозволяє розраховувати величини втрат енергії ΔE_2 і ΔE_3 робочого рідинного потоку на створення вільної поверхні поділу двох фаз при утворенні повітряно-краплинної й пінистого потоків. Для цього необхідно знати місце стрибка ущільнення в камері змішування пристрою ежекційного типу, яке можна встановити на основі експериментальних даних. Тоді із рівняння балансу енергії (3.3) будемо мати:

$$\Delta E_2 = \frac{\rho_p \cdot v_p^2}{2} - \frac{\rho_1 \cdot v_2^2}{2} + p_1 - p_2 - \Delta P_{mp1} - \Delta P_{mp3}, \quad (3.55)$$

$$\Delta E_3 = \frac{\rho_1 \cdot v_2^2}{2} - \frac{\rho_2 \cdot v_3^2}{2} + p_2 - p_3 - \Delta P_{mp4} - u \cdot p_0 \cdot \tau \cdot \ln \frac{p_3}{p_2}, \quad (3.56)$$

де всі величини розраховуються за наведеними вище рівняннями.

А для визначення можливих режимів руху газорідинного потоку рівняння для обчислення зміни (втрати) потужності потоку ΔN на ділянці від сопла до місця перерізу потоку газорідинної суміші після стрибка ущільнення набере вигляду

$$\Delta N = Q_1 \cdot \left(\frac{\rho_p \cdot v_p^2}{2} + p_1 + \frac{\gamma}{\gamma-1} \cdot u_0 \cdot p_0\right) - W \cdot \left(\frac{v_3^2}{2} + \frac{p_3}{\rho_2} + \frac{\Delta P_{mp1} + \Delta P_{mp3} + \Delta P_{mp4}}{\rho_1} + \frac{\Delta P_{mp4}}{\rho_2}\right) - Q_1 \cdot p_0 \cdot u_0 \cdot \tau \cdot \ln \frac{p_3}{p_2}, \quad (3.57)$$

де $W = \rho_1 v_2 F_3 = \rho_2 v_3 F_3$ – масова витрата газорідинної суміші.

Рух газорідинного потоку можливий лише за тих значень параметрів, за яких втрата потужності ΔN набирає додатних значень.

Основне завдання тепер полягає у тому, щоб на основі рівнянь (3.55)–(3.57) підібрати такі параметри можливого руху потоків рідини і газу, за яких відбувалося б максимальне і рівномірне по всьому об'єму насичення рідини га-

зом, що відповідає максимально можливим значенням ступеня аерації u , а також величинам ΔE_2 , ΔE_3 і ΔN .

Із рівнянь (3.22)–(3.25) бачимо, що відносні параметри потоку суміші за стрибком ущільнення залежать від числа Маха M_1 набігаючого потоку і об'ємної місткості газу α_1 перед стрибком, яка, у свою чергу, визначається ступенем аерації u .

Криві залежності об'ємної газомісткості α_1 від ступеня аерації u при різних значеннях тиску в приймальній камері p_1 (рис. 3.64) свідчать про те, що із збільшенням ступеня аерації u при зростанні тиску p_1 об'ємна газомісткість α_1 зростає значно повільніше.

Із залежності відносної зміни тиску p_3/p_2 , що відбувається під час стрибка, від ступеня аерації при різних значеннях числа Маха M_1 набігаючого потоку (рис. 3.65) бачимо, що при значеннях $M_1 > 1$ відносна зміна тиску $p_3/p_2 > 1$ зростає при збільшенні u тим більше, чим більше M_1 . При значеннях $M_1 < 1$ відносна зміна тиску $p_3/p_2 < 1$ наближається до 1 зі зростанням ступеня аерації u .

Із графічних залежностей відносних змін швидкості v_3/v_2 та об'ємної газомісткості α_2/α_1 від ступеня аерації при різних значеннях числа Маха M_1 (рис. 3.66, 3.67) бачимо, що при $M_1 > 1$ швидкість потоку і газомісткість під час стрибка зменшуються, а при $M_1 < 1$ – збільшуються.

Це дає можливість зробити висновок, що при параметрах руху газорідного потоку, для яких $M_1 > 1$, в камері змішування відбувається стрибок ущільнення, що характеризується стрибкоподібним збільшенням тиску та зменшенням швидкості потоку й об'ємної газомісткості, а при параметрах руху газорідного потоку, для яких $M_1 < 1$, у камері змішування відбувається стрибок розрідження, що характеризується стрибкоподібним зменшенням тиску та збільшенням швидкості потоку й об'ємної газомісткості.

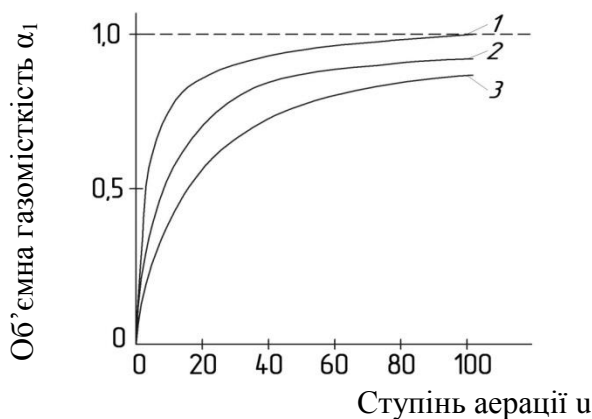


Рисунок 3.64 – Залежність об'ємної газомісткості від ступеня аерації при різних значеннях тиску в приймальній камері: 1 – 0,3 МПа; 2 – 0,75 МПа; 3 – 1,4 МПа

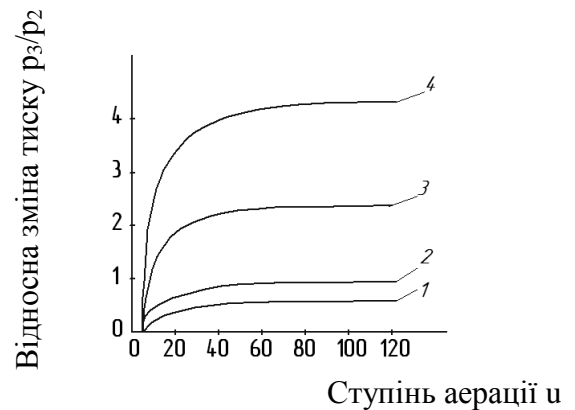


Рисунок 3.65 – Залежність відносної зміни тиску, що відбувається під час стрибка, від ступеня аерації при різних значеннях числа Маха набігаючого потоку: 1 – 0,8; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2

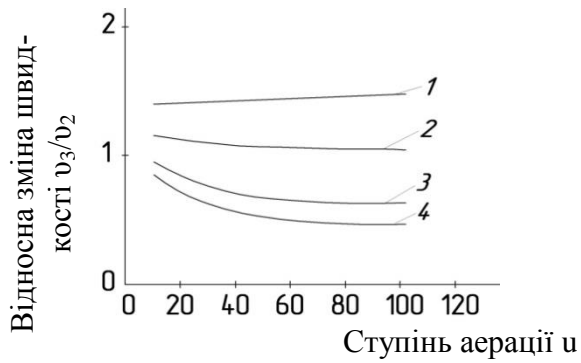


Рисунок 3.66 – Залежність відносної зміни швидкості, що відбувається під час стрибка, від ступеня аерації при різних значеннях числа Маха: 1 – 0,8; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 2

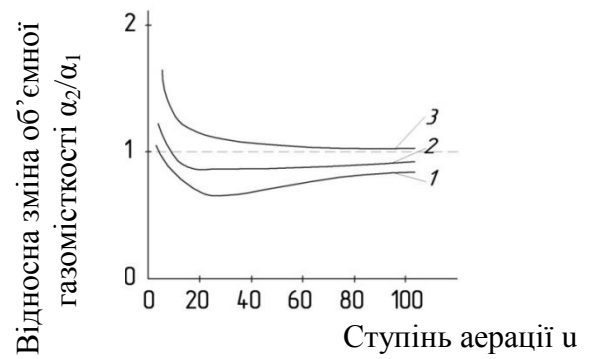


Рисунок 3.67 – Залежність відносної зміни об'ємної газомісткості, що відбувається під час стрибка, від ступеня аерації при різних значеннях числа Маха: 1 – 3; 2 – 1,5; 3 – 0,8

Оскільки енергетичні характеристики газорідного потоку визначаються не лише параметрами його руху, а і властивостями рідини й газу, то для проведення подальших розрахунків як рідину застосовують воду, в яку додають поверхнево-активні речовини з такими параметрами: густина $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$; коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma = 0,05 \text{ Н/м}$; коефіцієнт динамічної в'язкості $\mu_p = 10^{-3} \text{ Пас}$; температура $T = 300 \text{ К}$. Як газ застосовують повітря, що подається компресором у приймальну камеру з навколишнього середовища при $p_0 = 10^5 \text{ Па}$ і $T = 300 \text{ К}$. Коефіцієнт динамічної в'язкості повітря не залежить від тиску і при температурі $T = 300 \text{ К}$ дорівнює $\mu_p = 1,88 \cdot 10^{-5} \text{ Пас}$. Графічні залежності (рис. 3.68–3.71) побудовані для таких геометричних розмірів пристрою ежекційного типу: діаметр ежекційної камери $d = 0,006 \text{ м}$; діаметр камери змішування $D = 0,012 \text{ м}$; витрата рідини $Q_1 = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; тиск рідини $P_1 = 1,4 \text{ МПа}$.

Залежності втрат потужності потоку на створення газорідної суміші ΔN від ступеня аерації при різних значеннях тиску в приймальній камері p_1 показані на рис. 3.68, із якого бачимо, що зі зростанням p_1 загальні втрати потужності ΔN на створення вільної поверхні рідини збільшуються. Всі три графічні залежності ΔN від u мають максимуми при тих значеннях u , для яких число Маха M_1 (рис. 3.69) дещо більше від 1, що відповідає стрибку ущільнення.

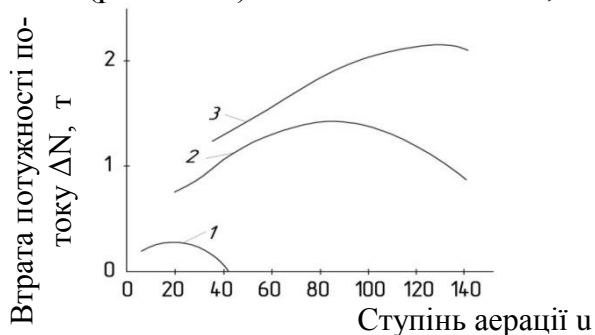


Рисунок 3.68 – Залежність втрат потужності потоку від ступеня аерації при різних значеннях тиску в приймальній камері: 1 – 0,3 МПа; 2 – 0,75 МПа; 3 – 1 МПа

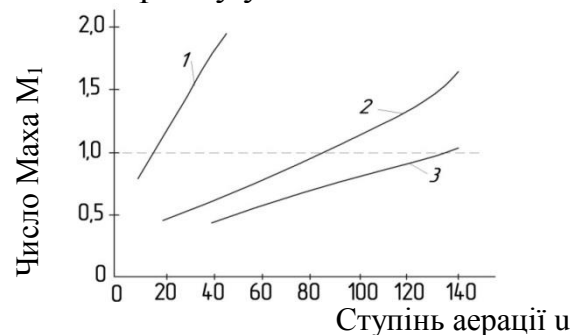


Рисунок 3.69 – Залежність числа Маха газорідного потоку від ступеня аерації при різних значеннях тиску в приймальній камері: 1 – 0,3 МПа; 2 – 0,75 МПа; 3 – 1 МПа

На рисунку 3.70 подані залежності втрат об'ємної густини енергії на створення повітряно-краплинного потоку ΔE_2 та рідинно-бульбашкового потоку ΔE_3 від ступеня аерації при тиску в приймальній камері $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$. Із графічної залежності бачимо, що зі збільшенням u величини ΔE_2 і ΔE_3 зменшуються, при значеннях u , для яких M_1 стає більшим від 1, $\Delta E_3 < 0$. Це означає, що вся енергія потоку витрачається на роботу стискання суміші під час стрибка ущільнення ($A = Q_1 u p_0 \ln(p_3/p_2)$), і бульбашки повітря під час стрибка і безпосередньо після нього не утворюються.

На рисунку 3.71 наведена розрахункова схема розподілу статичного тиску на довжині пристрою ежекційного типу при тиску $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$ у приймальній камері для оптимального значення ступеня аерації $u = 85$, при якому ΔN набуває максимального значення. Розрахунки показують, що довжина ділянки $l_1 \ll l_2 = 100-120 \text{ мм}$, тому втрати тиску на тертя $\Delta P_1 \ll \Delta P_3, \Delta P_4$, а значення втрат тиску на 10 мм довжини ΔP_3 і ΔP_4 мають порядок 10^3-10^4 Па , тобто є незначними порівняно зі статичним тиском у пристрої. Стрибок ущільнення в камері змішування наближено визначається довжиною ділянки l_2 , оскільки розвинена теорія не дає розрахунку місця його знаходження. Вона зростає зі збільшенням тиску p_1 у приймальній камері. Процес закачування повітря і створення тиску в приймальній камері $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$ вважається ізотермічним, зниження статичного тиску від p_1 до $p_2 = 0,66 \text{ МПа}$ обумовлене рухом повітряної фази, підвищення статичного тиску від p_2 до $p_3 = 0,75 \text{ МПа}$ під час стрибка ущільнення ізотермічне.

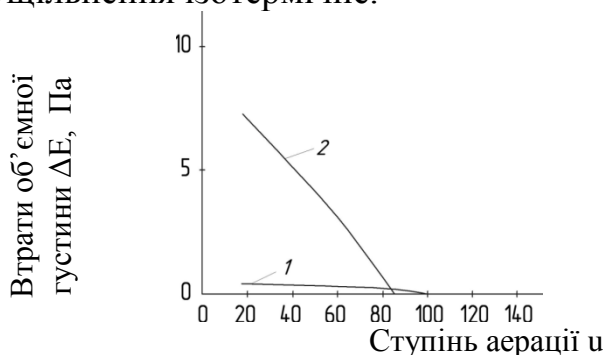


Рисунок 3.70 – Залежності втрат об'ємної густини енергії на створення повітряно-краплинного потоку ΔE_2 (крива 1) та рідинно-бульбашкового потоку ΔE_3 (крива 2) від ступеня аерації при тиску в приймальній камері $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$

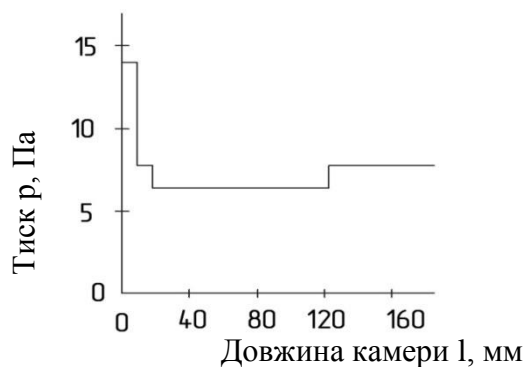


Рисунок 3.71 – Схема розподілу статичного тиску по довжині пристрою ежекційного типу при тиску $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$ у приймальній камері для значення ступеня аерації $u = 85$

На рисунку 3.72 подані залежності втрат потужності потоку на створення повітряно-рідинної суміші ΔN від ступеня аерації при двох різних діаметрах сопла й однакових значеннях витрати рідини $Q_1 = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ і тиску в приймальній камері $p_1 = 0,75 \text{ МПа}$, згідно з якими бачимо, що зменшення діаметра сопла призводить до збільшення втрат потужності на створення вільної поверхні і

зміщення максимуму ΔN у бік більших значень u . Це пояснюється збільшенням швидкості витікання рідинного потоку із сопла, що буде відбуватися при значно більшому початковому тиску в підвідному патрубку.

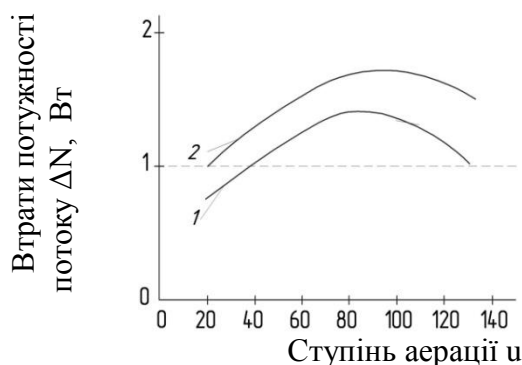


Рисунок 3.72 – Залежності втрат потужності потоку ΔN від ступеня аерації при зміні діаметра сопла: 1 – 0,006 м; 2 – 0,004 м

На основі цього встановлено, що найбільш ефективний режим руху газорідинного потоку для рівномірного насичення рідини газом з утворенням у подальшому дрібнодисперсного пінистого потоку реалізується при значеннях ступеня аерації, при яких число Маха M_1 газорідинного потоку більше від одиниці, але близьке до неї. У цьому випадку загальні втрати потужності потоку ΔN на створення вільної поверхні є максимальними, а в камері змішування відбувається стрибок ущільнення, необхідний для перетворення повітряно-краплинної суміші в рідинно-бульбашкову, хоча енергія потоку в стрибку витрачається на стиснення суміші, і під час стрибка та безпосередньо після нього бульбашки не утворюються. Вони будуть утворюватися лише в тих місцях пристрою, де відбувається різке зниження статичного тиску порівняно з тиском p_3 в камері змішування за стрибком ущільнення за рахунок роботи розширення газової фази.

Стрибок ущільнення характеризується різким підвищенням тиску. Для одержання стрибка ущільнення необхідно, щоб швидкість повітряно-краплинного потоку перевищувала швидкість звуку в ньому. Враховуючи це, можна зробити припущення, що геометричні форми, розміри складових частин піногенеруючого пристрою, а також режими і параметри є визначальними щодо ефективності його роботи.

Теоретично встановлено, що при вмісті газу (повітря) 20–80 % у рідині (воді) з поверхнево-активними речовинами для створення дрібнодисперсної піни швидкість потоку суміші перед стрибком ущільнення повинна досягати 30–40 м/с, а при вмісті газу (повітря) 80–95 % – 40–60 м/с. При збільшенні швидкості потоку рідини вище від встановленої межі відбувається зниження ефективності піноутворення, оскільки швидкість руху потоку перед стрибком ущільнення зростає, і відповідно зростає число Маха.

3.4.2.1.2. Методи визначення оптимальної конструкції піногенеруючого устаткування

Для зручності дослідження процесу піногенерування та відпрацювання всіх основних параметрів піногенеруючого пристрою при теоретичних та комп'ютерних дослідженнях вибрано односопловий пристрій ежекційного типу, за допомогою якого можна одержувати дрібнодисперсну піну.

Тому для досліджень підібрана комп'ютерна прикладна програма FlowSimulation, що є прикладним модулем SolidWorks, яка дає можливість проводити зміну вхідних параметрів рідини і повітря в широкому діапазоні, а також дає об'єктивну інформацію про необхідний параметр у будь-якій точці піногенеруючого пристрою. В цій програмі для числового розв'язання задач використовується метод кінцевих об'ємів та нестационарних рівнянь Нав'є – Стокса і теплопередачі. Дискретизація рівнянь здійснюється в консервативній формі, часткові похідні апроксимуються із другим порядком точності, похідні за часом – за неявною схемою Ейлера першого порядку. Одержані збіги розрахункових та експериментальних даних свідчать про можливість використання запропонованої програми для аналізу складних потоків.

Тривимірна модель односоплового піногенеруючого пристрою наведена на рис. 3.73. Програма FlowSimulation дає можливість також визначати в будь-якій точці піногенеруючого пристрою необхідний параметр. Ця програма дозволяє проводити аналіз і дослідження конфігурації, геометричних параметрів та режимів роботи піногенеруючого пристрою, а також визначати та вибирати їх раціональні значення для заданих умов. На рис. 3.74 наведено приклад визначення тиску в різних точках піногенеруючого пристрою з більш обтічними його основними елементами.

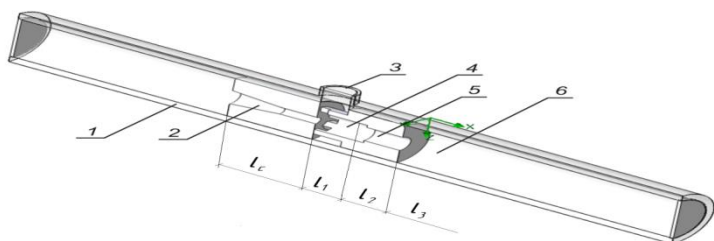


Рисунок 3.73 – Тривимірна модель односоплового піногенеруючого пристрою:
1 – корпус; 2 – сопло; 3 – патрубок підведення повітря; 4 – камера ежекції;
5 – камера змішування; 6 – дифузор

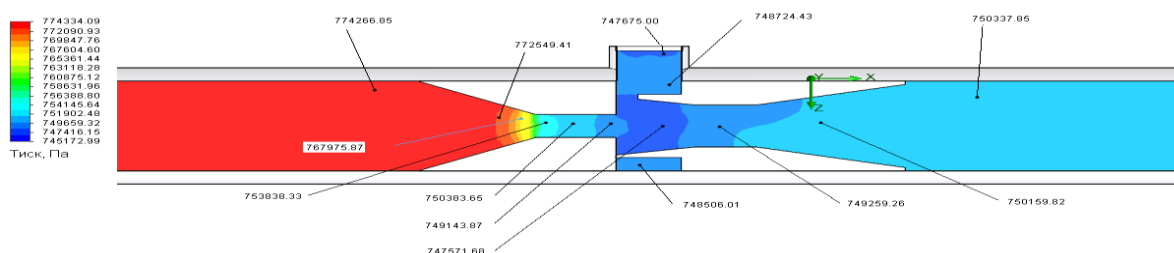


Рисунок 3.74 – Приклад визначення тиску в різних точках піногенеруючого пристрою з більш обтічними основними елементами

У процесі комп'ютерних досліджень на односопловому пристрої використовувалися різноманітні варіанти геометричних параметрів складових частин пристрою за різних режимів роботи. Пристрій досліджувався при зміні діаметра сопла, зміні довжини його циліндричної частини, при використанні приймальної частини камери змішування циліндричної або конічної форми, при подовженні її за допомогою додаткових втулок, при зміні відстані між соплом та камерою змішування. Підібрано найбільш характерні для конкретного дослідження граничні умови роботи піногенеруючого пристрою.

Подальші комп'ютерні дослідження односоплового піногенеруючого пристрою проводяться на ділянці L , показаній на рис. 3.74. Дослідження приймальної частини камери змішування для порівняння циліндричної і конічної конфігурацій проводилися за таких граничних умов: подача рідини (води) на вході – $0,004 \text{ м}^3/\text{с}$; тиск повітря на вході в підвідному патрубку – 10 МПа ; тиск на виході з пристрою – 10 МПа .

Розглянувши і проаналізувавши графічні залежності розподілу швидкості в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.75), встановлено, що максимальна швидкість рідини в соплі у пристрої із конічною приймальною змішувальною камерою є дещо меншою (165 та 162 м/с відповідно). У цьому пристрої також менша швидкість піни на виході (4,6 та 7,2 м/с), більш похила крива швидкості в камері змішування (порівняно зі стрибкоподібною зміною швидкості у пристрої із приймальною циліндричною частиною камери змішування).

Під час аналізу графічних залежностей розподілу тиску в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.76) встановлено, що у випадку використання у піногенеруючому пристрої конічної приймальної частини камери змішування необхідний тиск рідини на вході для забезпечення заданих граничних умов знижується з 24,8 до 20,4 МПа, при цьому також зменшується мінімальний тиск у камері змішування – з 7,2 до 5,9 МПа.

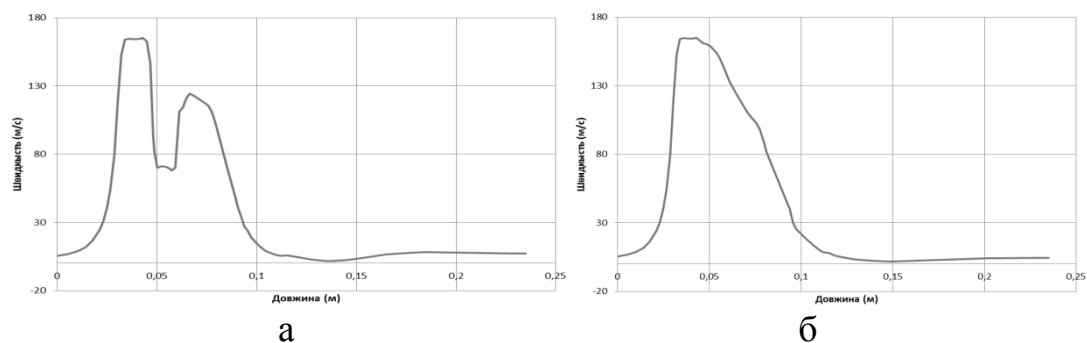


Рисунок 3.75 – Графічні залежності розподілу швидкості в поздовжньому перерізі пристрою: а – камера змішування із циліндричною приймальною частиною; б – камера змішування з конічною приймальною частиною

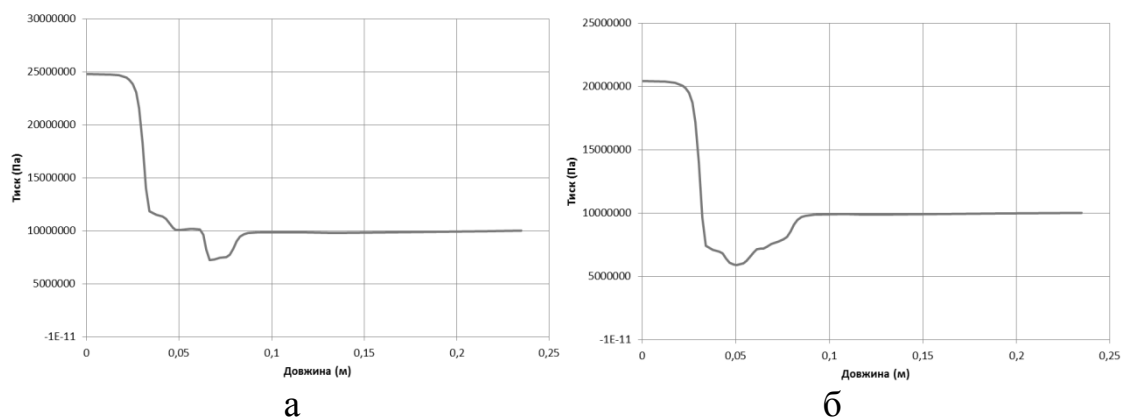


Рисунок 3.76 – Графічні залежності розподілу тиску в поздовжньому перерізі пристрою: а – камера змішування із циліндричною приймальною частиною; б – камера змішування з кінцевою приймальною частиною

Аналізуючи графічні залежності розподілу температури в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.77), встановлено, що у пристрої із циліндричною приймальною частиною камери змішування температура стрибкоподібно зростає і спадає у вхідній частині камери, потім зростає до температури, яка є вищою від температури у пристрої із кінцевою приймальною частиною камери змішування.

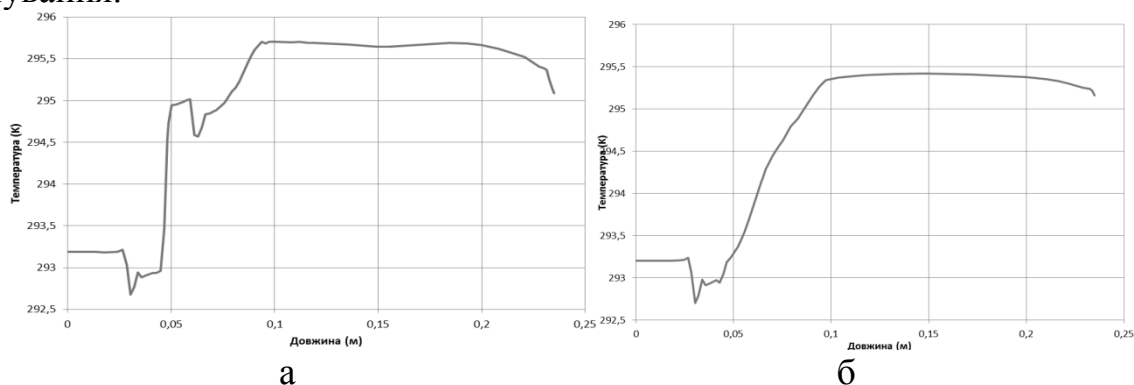


Рисунок 3.77 – Графічні залежності розподілу температури в поздовжньому перерізі пристрою: а – камера змішування із циліндричною приймальною частиною; б – камера змішування з кінцевою приймальною частиною

Дослідження проводилися на піногенеруючому пристрої з різними діаметрами циліндричної частини сопла. Розподіл швидкості, тиску і температури в поздовжньому перерізі пристрою із соплами різних діаметрів. У нашому випадку вибрані діаметри 4 і 6 мм. Розглянувши і проаналізувавши графічні залежності розподілу швидкості в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.78), встановлено, що найбільша швидкість – у перерізі сопла: зменшується від 98,7 до 41,4 м/с, але при цьому швидкість на виході із піногенеруючого пристрою зростає від 1,26 до 1,41 м/с, що приводить до збільшення продуктивності пристрою.

Під час аналізу графічних залежностей розподілу тиску в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.79) встановлено, що зі збільшенням діаметра сопла необхідні тиски рідини на вході для забезпечення заданих граничних умов зни-

жуються із 7 МПа при діаметрі сопла 4 мм до 1,4 МПа при діаметрі сопла 6 мм. При цьому найменший тиск у камері змішування зростає зі збільшенням діаметра сопла (відповідно 0,06 і 0,5 МПа), що свідчить про можливість зменшення тиску повітря на вході у піногенеруючий пристрій зі зменшенням діаметра сопла.

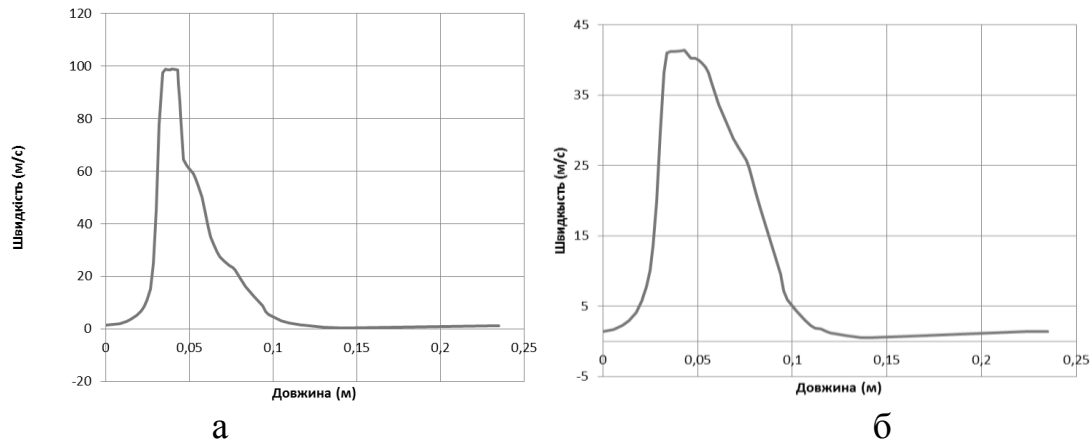


Рисунок 3.78 – Графічні залежності розподілу швидкості в поздовжньому перерізі пристрою: а – при діаметрі циліндричної частини сопла 4 мм; б – при діаметрі циліндричної частини сопла 6 мм

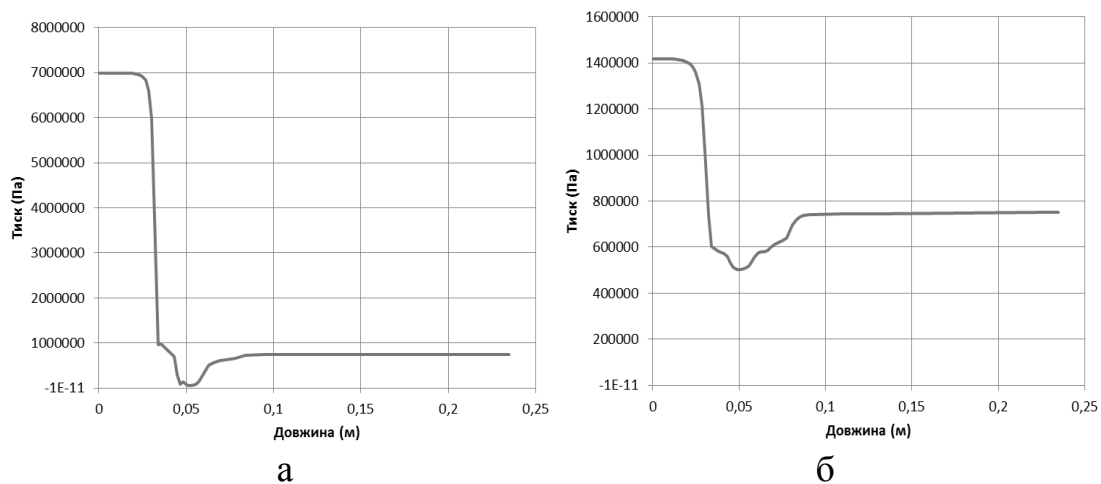


Рисунок 3.79 – Графічні залежності розподілу тиску в поздовжньому перерізі пристрою: а – при діаметрі циліндричної частини сопла 4 мм; б – при діаметрі циліндричної частини сопла 6 мм

Аналізуючи графічні залежності розподілу температури в поздовжньому перерізі пристрою (рис. 3.80), встановлюємо, що температура в камері змішування різко підвищується і залишається такою вздовж напрямку руху суміші до виходу, але при більшому діаметрі сопла стрибок температури менший, тож і на виході із пристрою температура піни дещо зменшується.

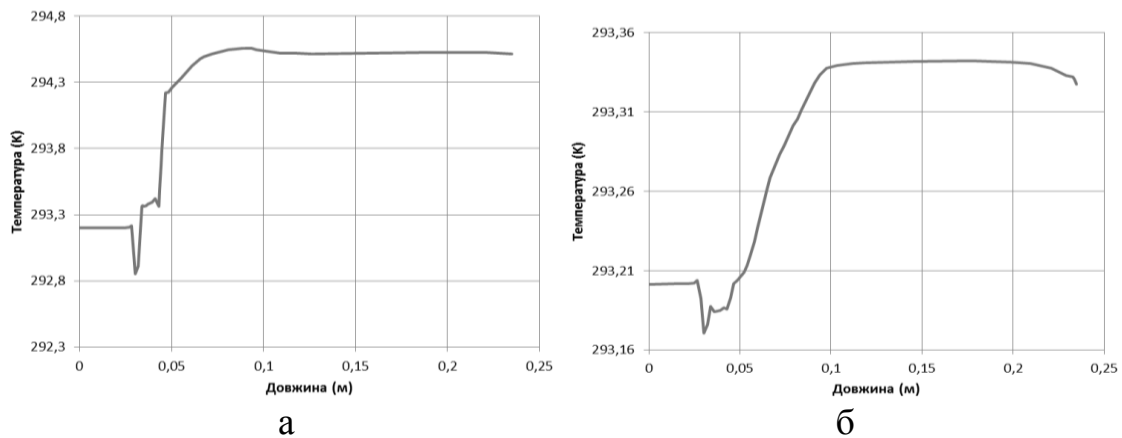


Рисунок 3.80 – Графічні залежності розподілу температури в поздовжньому перерізі пристрою: а – при діаметрі циліндричної частини сопла 4 мм; б – при діаметрі циліндричної частини сопла 6 мм

Розглянувши і проаналізувавши графічні залежності (рис. 3.78–3.80), робимо висновок, що для експлуатації в конкретних умовах придатні піногенеруючі пристрої з різними діаметрами змінних сопел.

Проводилися дослідження піногенеруючого пристрою при зміні довжини камери змішування, для чого на виході з її циліндричної частини встановлювалися додаткові кільця однакового і різного діаметрів. Також проводилося визначення довжини циліндричної частини сопла, відстані між соплом та камерою змішування. Створюючи тривимірну модель п'ятисоплового піногенеруючого пристрою (рис. 3.81), його геометричні розміри вибрано з урахуванням проведених комп'ютерних досліджень односоплового піногенеруючого пристрою. При цьому на виході кожного ежектора п'ятисоплового піногенеруючого пристрою утворюватиметься дрібнодисперсна піна і при змішуванні отриманих потоків не відбуватиметься її якісної зміни.

Пропонований піногенеруючий пристрій показано на рис. 3.82. В корпусі 1 циліндричної форми розміщено багатосоплову вставку 2 із змінними соплами 3, ежекційну вставку 4, канали 5 для підведення повітря або газу із заглушками 6, камери ежекційні попереднього змішування із дифузорних дисків 7 різної довжини,

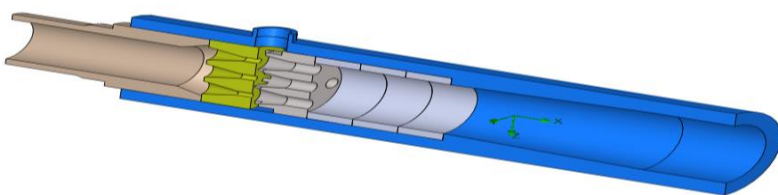


Рисунок 3.81 – П'ятисопловий піногенеруючий пристрій оптимальної конструкції

розміщених співвісно соплам, камера кавітаційна проміжного змішування із розпірних кілець загального дифузора 8 різної довжини, завихрювач пінної суміші 9, дифузор 10 із камерою турбулентного змішування. За допомогою перевідників 11 і 12 та хвостовиків швидкознімних 13 здійснюється монтаж пристрою в обв'язці бурового насоса чи насосного агрегата.

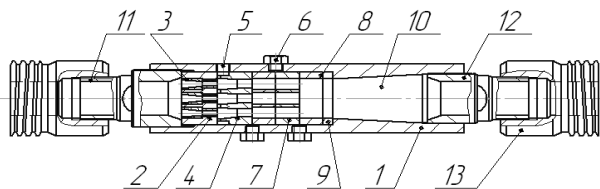


Рисунок 3.82 – Піногенеруючий пристрій багатосопловий: 1 – корпус; 2 – багатосоплова вставка; 3 – змінні сопла; 4 – ежекційна вставка; 5 – канал підведення повітря; 6 – заглушки; 7 – дифузорний диск; 8 – розпірне кільце загального дифузора; 9 – завихрювач пінної суміші; 10 – дифузор; 11, 12 – перевідники; 13 – хвостовики швидкознімні

Піногенеруючий багатосопловий пристрій працює так. Промивальна рідина надходить у корпус 1 пристрою і далі через перевідник 11, вставку багатосоплову 2 зі змінними соплами 3 – в ежекційну вставку 4, де за рахунок ефекту ежекції захоплює повітря, що підводиться каналами 5, в камерах попереднього змішування із дифузорних дисків 7 різної довжини частково змішується повітря з рідиною, далі суміш надходить у камеру кавітаційного проміжного змішування із розпірних кілець загального дифузора 8 різної довжини, що знаходиться на початку дифузора 10, де за рахунок змішування багатьох струменів утворюється кавітація, що сприяє диспергуванню та інтенсивному перемішуванню повітря або газу з рідиною, далі проходить через завихрювач пінної суміші 9, який сприяє якісному змішуванню й утворенню пінної суміші в камері змішування, що розміщена в дифузорі 10, де рідина рухається у турбулентному режимі, і закріплюється ефект насичення промивальної рідини газом та відбувається піноутворення.



Рисунок 3.83 – Лабораторно-експериментально-промисловий зразок піногенеруючого пристрою ПГП-100х25-5

Можливе різне комплектування пристрою за рахунок установлення у його корпус різної кількості дифузорних дисків і розпірних кілець загального дифузора для зміни довжин камер змішування. Діаметри змінних сопел – 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10 і 15 мм. При використанні сопел діаметрами 2–8 мм застосовується п'ятисоплова вставка, при соплах діаметром 10 і 15 мм – трисоплова.

трисоплова.

Використовуючи результати теоретичних та комп'ютерних досліджень у Полтавському ВБР БУ «Укрбургаз» пристрою, що показаний на рис. 3.83, присвоєно марку ПГП-100х25, де 100 – зовнішній діаметр пристрою, мм; 25 – максимальний тиск, МПа; 5 – кількість сопел.

3.4.2.1.3. Використання компресорного устаткування нового покоління для піноутворення з можливістю регулювання основних параметрів

Для можливості найбільш раціонального використання піногенеруючого устаткування передбачена схема обв'язки циркуляційної системи при бурінні із промиванням свердловини піною (рис. 3.84).

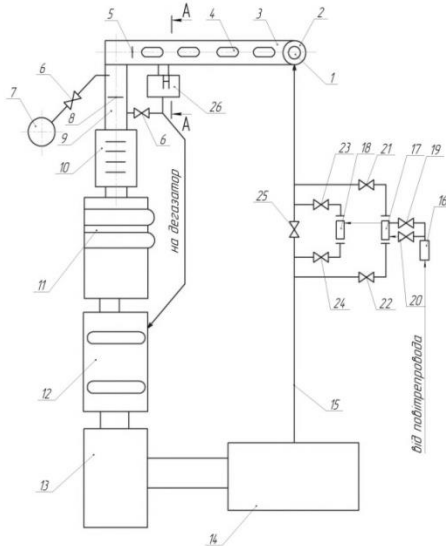


Рисунок 3.84 – Схема обв'язки циркуляційної системи при бурінні із промиванням свердловини піною: 1 – свердловина; 2 – герметизатор гирла; 3 – закритий жолоб; 4 – люк; 5 – шибер; 6, 19–25 – запірний елемент; 7 – доливна ємність; 8 – поворотна заслінка; 9 – відкритий жолоб; 10 – бункер-шламовловлювач; 11 – блок очищення; 12 – дегазатор; 13 – приймальний резервуар; 14 – насосний агрегат; 15 – маніфольд; 16 – компресор; 17, 18 – піногенеруючий пристрій; 26 – вакуумний насос

Над свердловиною 1 встановлюється герметизатор гирла свердловини 2, призначений для герметизації простору між основною трубою і рознімною воронкою, що встановлюється над противикидним обладнанням з метою відсікання піни. Жолобна система бурової установки складається з початкової ділянки – закритого жолоба 3 із відкидними люками 4 для очищення жолоба від шламу – та кінцевої ділянки – відкритого жолоба 9.

У кінці закритого жолоба 3 встановлюються регулювальний шибер 5 та вакуумний насос 26, що передбачають відбирання повітря з пінної системи і, можливо, частини промивальної рідини з подальшим транспортуванням у відкритий жолоб або на дегазатор 12 за наявності розчиненого газу. У випадку осідання піни після вакуумного насоса рідина надходить у відкритий жолоб, а за відсутності осідання піни рідина може подаватися на дегазатор. На ділянці відкритого жолоба передбачається встановлення поворотної заслінки 8, що забезпечить доливання свердловини з доливної ємності 7 через засувку 6 у процесі спуско-підймальних операцій, а також бункера-шламовловлювача 10, який здійснює очищення промивальної рідини та осаджування піни, що надійшла у

відкритий жолоб. У подальшому промивальна рідина надходить на блок очищення 11, на якому встановлене обладнання для очищення – вібросита та гідроциклон. Після дегазатора 12 рідина надходить у приймальний резервуар 13, а потім насосний агрегат 14 через маніфольд 15 нагнітає промивальну рідину в свердловину. Вакуумний насос з'єднаний із верхньою ділянкою закритого жолоба, а по центру розміщується сітчаста перегородка для розділення рідини й піни. Передбачається також очищення сітчастої перегородки у випадку її зашлямування через регулювальний шибер 5 та люк 4. Довжина сітчастої перегородки, яку пропонується встановити у кінці закритого жолоба посередині його горизонтального перерізу, повинна становити 1,5–2 м.

Реалізацію промивання свердловини за допомогою піни забезпечують два піногенеруючих пристрої 17 і 18, які монтуються на ділянці байпаса із запірними елементами. Якщо необхідно здійснити циркуляцію рідиною, то закриваються запірні елементи 21–24 та відкривається запірний елемент 25. Для забезпечення аерації розчину циркуляція здійснюється відкриттям запірних елементів 21–24 та закриттям запірного елемента 25. Повітря подається за допомогою компресора 16. Регулювання потоку повітря здійснюється за допомогою запірних елементів 19 і 20.

На рис. 3.84, поз. 16, пропонується використання компресорного устаткування нового покоління з можливістю регулювання основних параметрів, що забезпечить підтримування роботи піногенеруючого пристрою в заданих режимах.

Результати досліджень і випробувань піногенеруючого пристрою на свердловинах Полтавського ВБР БУ «Укрбургаз», глибина однієї з яких становила 4 700 м, показали високу ефективність пропозиції та адекватність результатів параметрам прогнозу, зокрема і запропонованої схеми об'язки циркуляційної системи. Розроблена схема дає можливість зручного переходу промивання свердловини від промивальної рідини до піни і навпаки із забезпеченням виконання необхідних технологічних процесів. При руйнуванні піни, що виходила із свердловини, без використання хімічних піногасників при повторних створеннях піни економія поверхнево-активних речовин становила понад 50 %, оскільки немає потреби в нейтралізації дії хімічних елементів, що входять до складу піногасників. Крім позитивного економічного ефекту, зменшення кількості використовуваних поверхнево-активних речовин дозволить покращити екологічний стан на території бурової установки.

3.5. Комплекс устаткування для термогазового впливу на нафтовий пласт БКУ-20/35 У1

Одним із перспективних рішень підвищення ефективності розроблення родовищ із важковидобувними запасами нафти є технологія термогазового впливу на нафтовий пласт. Метод термогазового підвищення нафтовіддачі поєднує у собі тепловий та газовий вплив і передбачає накачування повітря та його трансформацію за рахунок внутрішньопластових окисних і термодинамічних процесів у вуглекислий газ або легкі вуглеводні.

Термогазовий метод у 70-ті рр. минулого століття освоєний на виробленому Гнединцевському родовищі Чернігівської обл. Сьогодні цей метод широко застосовується в США, Китаї, Індонезії, Бразилії та ряді інших країн. Останніми роками в країнах близького зарубіжжя проводиться робота з обґрунтування та підготовки промислових випробувань термогазового методу в різних геолого-промислових умовах.

Розроблена компресорна установка високого тиску для термогазового впливу на нафтовий пласт. Вона призначена для компресування повітря і накачування його в пласт при розробленні родовищ із важковидобувними запасами нафти.

Принципова схема двомодульної компресорної установки високого тиску для термогазового впливу на нафтовий пласт наведена на рис. 3.85. Установка містить два працюючі на один колектор і об'єднані у блоки-контейнери із системами їхнього функціонального забезпечення паралельно встановлені компресорні модулі 1 і 2, оснащені внутрішньомодульною системою контрольно-вимірювальних приладів, а також блок-контейнер 3 об'єднаної системи автоматичного міжмодульного керування і регулювання верхнього рівня, що містить систему віддаленого моніторингу 4.

Кожний блок-контейнерний компресорний модуль високого тиску (рис. 3.86) установки містить багатоступеневий (у нашому випадку 7-ступеневий) поршневий компресор 2 із приводним електродвигуном 7, з'єднані між собою пружною втулково-пальцевою муфтою 11, оснащений частотним перетворювачем 6 для забезпечення можливості регулювання продуктивності за стисненим повітрям і системами підготовки (очищення) повітря 1 від небажаних частинок пилу та масла на вході в компресор, повітряного охолодження 4 для проміжного в процесі стискання і кінцевого охолодження стисненого повітря в кожному ступені, системами вологомасловідділення 5 після кожного ступеня стискання і змащення 9, буферну ємність 3 для збирання та відведення конденсату і запобіжний клапан 10 після кожного ступеня стискання для підбурення надлишкового тиску, а також трубопровідну обв'язку із запірною та контрольно-регулювальною арматурами.

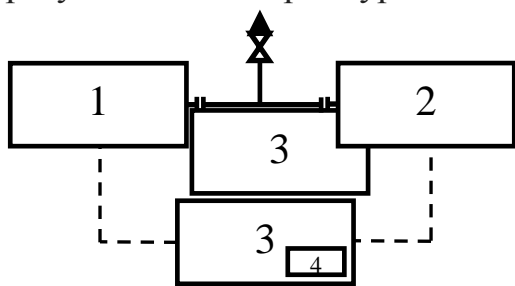


Рисунок 3.85 – Принципова схема двомодульної компресорної установки високого тиску для термогазового впливу на нафтовий пласт

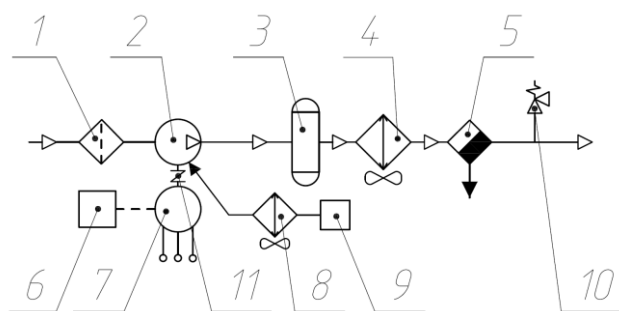


Рисунок 3.86 – Блок-контейнерний компресорний модуль високого тиску

Установка працює так (рис. 3.87). Повітря забирається з атмосфери за межами блока-контейнера і, проходячи через вхідний фільтр 1, де відбувається його грубе очищення від механічних і можливих масляних домішок, подається на 1-й ступінь 9.1 компресорного агрегата, розміщеного в блоці-контейнері.

Процес стискання повітря за ступенями поршневого компресорного агрегата полягає в такому: компресор, що приводиться в рух привідним електродвигуном 2, виконує зворотно-поступальний рух поршня I–VII ступенів. При цьому поршні переміщуються в циліндрах з одного крайнього положення в інше. Для зниження тертя і зношування деталей поршневої групи в циліндрах I–VII ступенів компресора під тиском за допомогою масляного насоса 8 із розподільником проводиться упорскування компресорного масла. Стиснене в ступені повітря витісняється в буферну ємність 11.1.

Як відомо, процес стискання повітря супроводжується підвищенням температури. Для його охолодження в конструкції передбачений апарат повітряного охолодження, що складається із блока теплообмінників 12.1–12.7, у якому нагнітання охолодного повітря забезпечується вентилятором осьового типу 4, що приводиться в дію електроприводом 3. Для подальшого охолодження стиснене повітря з ємності 11.1 подається в теплообмінний апарат 12.1 першого ступеня. У процесі охолодження в стисненому повітрі утвориться краплинна волога, для видалення якої, а також зважених частинок компресорного масла призначений вологомасловіддільник 13.1, в якому поступово відбувається нагромадження маслорозділювача, для зливу якого передбачений конденсатовідвідник 15.1. Конденсат зливається у спеціальну ємність 6. Охолоджене і звільнене від краплинної вологи і масла повітря, пройшовши клапан запобіжний 14.1, надходить на всмоктування в II ступені 9.2 компресора, де відбувається його подальше стискання.

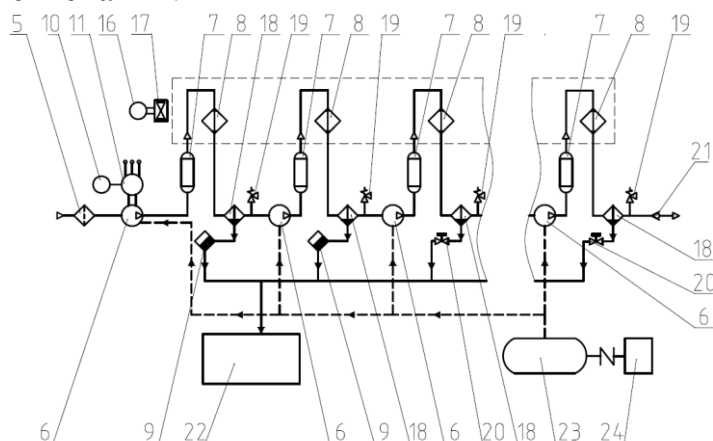


Рисунок 3.87 – Компресорна установка високого тиску термогазового впливу на нафтовий пласт

Процес дії циліндрів наступних ступенів 9.2–9.7 аналогічний роботі циліндра I ступеня стискання. Після кожного ступеня стискання повітря охолоджується в теплообмінниках 12.2–12.7 системи охолодження. Відділення стисненого повітря від краплинної вологи і масла відбувається у вологомасловіддільнику 13.2–13.7, після чого повітря надходить на всмоктування до наступного ступеня.

пеня, де відбувається його подальше стискання. Відведення водомасляної емульсії із вологомасловіддільника 13.3–13.7 після III–VII ступенів компресора здійснюється за допомогою системи продування (розвантаження) ступенів стискання.

Процес продування (розвантаження) ступенів компресора здійснюється по черзі в автоматичному режимі. Суть його полягає в такому: періодично за допомогою тимчасових вставок і команд системи керування відбувається подача так званого «керуючого» повітря з нагнітального колектора III ступеня на клапан продувний 16.1–16.5, що забезпечує відкриття продувного трубопроводу, що з'єднує вологомасловіддільник 13.3–13.7 з ємністю 6, передбаченою для накопичення конденсату.

У таблиці 3.10 наведені технічні параметри устаткування для термогазового впливу на нафтовий пласт установки БКУ-20/35 У1, розробленої ПАТ «НПАТ «ВНДІкомпресормаш». На рисунку 3.88 показані компресорна установка БКУ20/35 і площадка на свердловині при реалізації технології термогазового впливу на Вишанському родовищі РУП «ВО «Білорусьнафта» (Республіка Білорусь). На рисунку 3.89 наведений приклад графіка зміни коефіцієнта вилучення нафти та розподілу середньопластового тиску в пласті. Як бачимо із графіка, коефіцієнт вилучення нафти лінійно зростає до 75 % при застосуванні термогазового впливу на пласт; при цьому середньопластовий тиск підвищується із 25 000 до 27 250 кПа, а потім різко знижується до 26 000 кПа. Об'ємна продуктивність установки БКУ-20/35 У1 виробництва ПАТ «ВНДІкомпресормаш» для термогазового впливу на нафтовий пласт за повітрям, зведена до початкових умов (під час роботи 2 компресорів), становить 20 м³/хв, кінцевий надлишковий тиск повітря – 35 МПа, при цьому потужність, споживана установкою БКУ, не перевищує 400 кВт.

Таблиця 3.10 – Технічні параметри устаткування для термогазового впливу на нафтовий пласт БКУ-20/35 У1

Стисливе середовище	атмосферне повітря
Об'ємна продуктивність установки БКУ щодо повітря, зведена до початкових умов, м ³ /хв (під час роботи 2 компресорів)	20
Ступінь регулювання продуктивності, %	30–100
Регулювання продуктивності	зміною обертів привода пристроєм частотного регулювання
Тиск повітря кінцевий надлишковий, МПа	35
Температура повітря, °С	–35–+40
Температура повітря на виході з установки, не більше, °С	70
Потужність, споживана установкою БКУ, не більше, кВт	400
Габаритні розміри установки, не більше, мм: – модуля компресора високого тиску – модуля системи керування	6 000×2 438×2 591 4 000×2 438×2 591
Загальна маса установки (трьох модулів із устаткуванням і зовнішньою трубопровідною обв'язкою), кг	25 000
Режим роботи	цілодобово з можливістю роботи одного компресора
Компресор 4ВМ2.5-10/350	поршневий, опозитний, чотирирядний, семиступеневий, шестициліндровий
Тип електродвигуна	бризкозахиснений, 3-фазний, асинхронний

Продовження таблиці 3.10

Потужність привідного електродвигуна, кВт	200
Привід компресора	прямий, через пружну муфту
Система охолодження компресора і стисненого повітря	повітряна



а



б

Рисунок 3.88 – Компресорна установка БКУ20/35 (а) і площадка на свердловині (б) під час реалізації технології термогазового впливу на Вишанському родовищі РУП «ВО «Білорусьнафта»



Рисунок 3.89 – Зміна коефіцієнта вилучення нафти і розподіл середньопластового тиску в пласті при термогазовому впливі

3.6. Підвищення ефективності газліфтного видобування нафти за допомогою компресорів нового покоління

Газліфтна експлуатація свердловин може бути безперервною або періодичною. Періодичний газліфт застосовується на свердловинах із дебітом від 40 до 60 м³/добу або з низьким пластовим тиском. Висота підняття рідини при газліфті залежить від можливого пускового тиску газу і глибини занурення колони НКТ під динамічний рівень. У середньому діапазон використовуваних значень пускового тиску газу становить від 4 до 14 МПа.

Важливою особливістю газліфтного способу є широкий діапазон можливих подач, що дозволяє його використовувати для експлуатації свердловини як із низьким (менше 40 м³/добу), так і з високим дебітом (до 1 600 м³/добу), а також свердловини з високими газовими факторами і вибійними тисками нижче від тиску насичення. Газліфт поділяється на два типи: компресорний і безкомп-

ресорний. При компресорному газліфті для стиснення попутного газу застосовуються компресори, а при безкомпресорному газліфті використовується газ газового родовища, що перебуває під тиском, або з інших джерел.

Газліфт щодо інших механізованих способів експлуатації свердловин має ряд переваг, зокрема: можливість відбирання значних об'ємів рідини з великих глибин на всіх етапах розроблення родовища при високих техніко-економічних показниках; простота свердловинного обладнання та зручність його обслуговування; ефективна експлуатація свердловин із значними викривленнями стовбура; експлуатація свердловин у високотемпературних пластах і з високим газовим фактором; можливість здійснення всього комплексу дослідницьких робіт із контролю роботи свердловини; повна автоматизація і телемеханізація процесів видобування нафти; великі міжремонтні періоди роботи свердловин одночасно з досить високою надійністю обладнання і всієї системи в цілому; можливість одночасно-роздільної експлуатації двох і більше пластів; простота попередження відкладення парафіну, солей і корозійних процесів; простота робіт підземного поточного ремонту свердловини та з відновлення працездатності підземного обладнання.

Недоліками газліфта за традицією вважаються високі початкові капітальні вкладення, фондоємність і металомісткість. Ці показники багато в чому залежать від прийнятої схеми облаштування промислу, ненабагато перевищують показники при насосному видобутку. Найбільше число елементів у системі газліфта і більш складне обладнання використовуються у випадку компресорного газліфта.

Сучасний газліфтний комплекс являє собою замкнену герметичну систему високого тиску (рис. 3.90). Основними елементами цієї схеми є: свердловини 1, компресорні станції 3, газопроводи високого тиску, трубопроводи для збирання нафти і газу, сепаратори різного призначення 7, газорозподільна батарея 4, групові виміри установки, системи очищення і осушення газу з регенерацією етиленгліколю 6, дотискні насосні станції, нафтозбірний пункт, система керування і контролю за роботою системи, система енергозабезпечення та ін.

Принципова схема газліфтного циклу наведена на рис. 3.91. За наявності газової свердловини високого тиску реалізується безкомпресорний газліфт.

Газ із свердловини 1 через газовий сепаратор 2 подається в теплообмінник 3. Нагрітий газ після додаткового очищення в сепараторі 4 проходить через газорозподільну батарею 5 і спрямовується до газліфтних свердловин 6. Продукція зі свердловин спрямовується в нафтогазовий сепаратор 7, після чого нафта надходить у колектор, а газ, що містить краплини нафти, проходить додаткове очищення в сепараторі 8 і після стиснення в компресорній станції 9 надходить у систему промислового збирання.

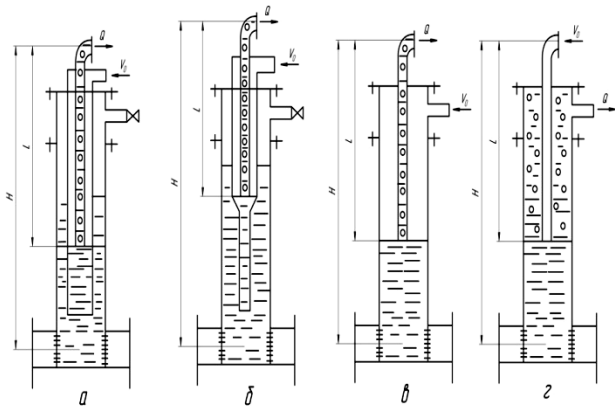


Рисунок 3.92 – Газліфтні підйомники:

а, б, в – відповідно дво-, півтора- і однорядний підйомники кільцевої системи;
г – однорядний підйомник центральної системи

3.7. Використання компресорних станцій для ремонту і випробувань магістральних газопроводів

3.7.1. Ремонт і випробування магістральних газопроводів за допомогою компресорних станцій СД, СДА, НДА

Вирішити проблему забезпечення стисненим повітрям об'єктів нафтогазової галузі, віддалених від джерел електроенергії, які перебувають у важкодоступних районах, може пересувна компресорна станція із дизельним приводом. ТОВ «МІКЕМ» має великий досвід проектування пересувних компресорних станцій високого тиску. Нові компресорні станції підприємства розроблені для переоснащення парку застарілих станцій і призначені для роботи в усіх кліматичних поясах при температурі повітря від мінус 45° до +45°.

При проектуванні пересувних станцій основним завданням є забезпечення максимально тривалого безаварійного періоду між поточними технічними обслуговуваннями і мінімальним обсягом робіт під час їх виконання з можливістю виконання всього обсягу робіт обмеженими силами і засобами обслуговуючого персоналу.

Повнопривідне шасі дозволяє станції обслуговувати об'єкти, що перебувають у важкодоступних районах. Із застосуванням зазначених пріоритетних напрямів розроблена пересувна компресорна станція СД-30/120 (рис. 3.93, табл. 3.11).

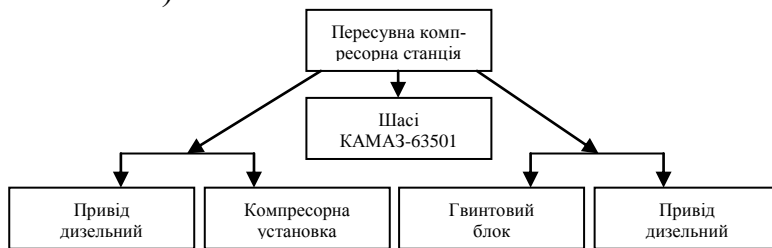


Рисунок 3.93 – Схема та загальний вигляд компресорної станції СД-30/120

Нова розробка 2012 року – це станція СД-60/100. Спеціально для станцій високої продуктивності розробляється нова поршнева база 6ВУ4, виконана за V-подібною схемою, шестирядна, із номінальним поршневим зусиллям 4 т. с. Станції типу СД-30/120 і СД-60/100 дозволять скоротити загальний парк компресорних станцій, що перебувають в експлуатації, і тим самим скоротити фінансові витрати.

Таблиця 3.11 – Технічні параметри станції СД 30/120 для пневматичних випробувань магістральних нафто- і газопроводів

Стислий газ	атмосферне повітря
Об'ємна продуктивність за азотом, зведена до початкових умов, м ³ /с (м ³ /хв)	0,5 ± 0,032 (30 + 1,89)
Тиск початковий	атмосферне
Тиск кінцевий номінальний, надлишковий, МПа (кгс/см ²)	24, 52 (250)
Компресор, тип	гвинтовий I-ступеневий CF-180, дотискний поршневий II-ступеневий 6В 1112,-2,1/12-120
Привідний дизельний двигун	ЯМЗ, ТМЗ
Охолодження	повітряне
Потужність, споживана станцією при номінальній продуктивності і кінцевому тиску, кВт, не більше	480
Шасі станції	автомобіль КамАЗ-63501
Габаритні розміри станції, мм, не більше	
Довжина	11 070
Ширина (по контейнеру)	2 500
Висота	4 000

Для підвищення безпеки процесу нафтовидобування і пневмовипробувань газопроводів як робоче середовище широко використовується інертний газ – азот. Інертне газове середовище (90–95 % азоту) одержують шляхом мембранного поділу атмосферного повітря. Після попереднього стискання і підготовки повітря в мембранному блоці МБР розділяється на кисень та азот. Кисень відділяється в атмосферу, інертна суміш подається у свердловину або газопровід.

Для забезпечення потреб у стисненому азоті призначені пересувні станції СДА. Головна відмінність цих станцій від станцій СД – наявність розділового мембранного блока. Основний ряд азотних компресорних станцій наведений на рис. 3.94.

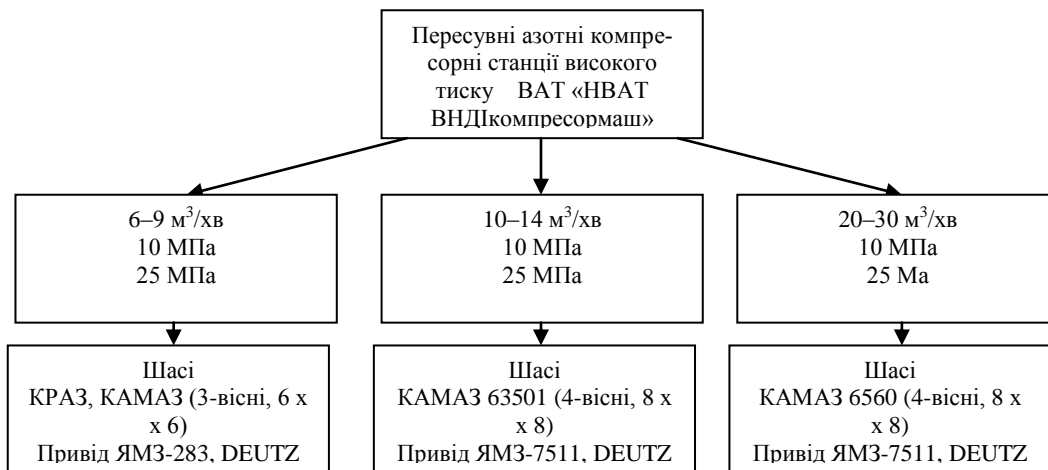


Рисунок 3.94 – Класифікація азотних компресорних станцій високого тиску

Азот, вироблений цим устаткуванням, у нафтогазовій промисловості застосовується як контрольована нейтральна атмосфера для підтримання внутрішньопластового тиску і збільшення видобування продукту. Азотні мембранні станції і установки широко застосовуються у складі: установок компримування і підготовки вуглеводнів, систем перекачування СУГ; електростанцій із водневим охолодженням генераторів потужністю понад 200 МВт.

Розроблені модифікації: АМГП – пересувні, у контейнерному виконанні, змонтовані на базі стандартних причепів та напівпричепів – контейнеровозів, повнокомплектні (рис. 3.95 і 3.96). СДА – пересувні, у контейнерному виконанні, змонтовані на базі автомобіля підвищеної прохідності (КРАЗ, КАМАЗ, МЗКТ, УРАЛ), повнокомплектні, автономні (рис. 3.97, табл. 3.12).



Рисунок 3.95 – Станція азотна мембранна гвинтова пересувна



Рисунок 3.96 – Станція азотна мембранна гвинтова пересувна



Рисунок 3.97 – Станція самохідна дизельна азотна

3.7.2. Устаткування для евакуації газу з магістральних газопроводів МКС-600

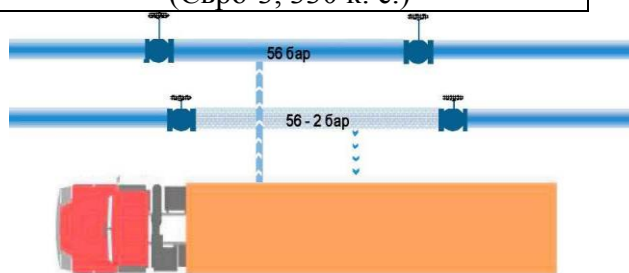
Для евакуації газу з магістральних газопроводів використовують установки компресорні серії ВВ повітряні з гвинтовим компресором і приводом від електродвигуна продуктивністю від 23 до 100 м³/хв і кінцевим абсолютним тиском 8–10 кгс/см² (табл. 3.12, рис. 3.98).

3.7.3. Комплект устаткування для ремонту та очищення магістральних нафтопроводів СДА-30/25 (N 95 %)

Для ремонту й очищення магістральних нафтопроводів застосовують компресорні станції, створювані на базі устаткування АГНКС-45, АГНКС-60, АГНКС-75 та призначені для подачі природного газу (метану).

Таблиця 3.12 – Технічні параметри устаткування для видобування газу з магістральних газопроводів

Модель компресорної установки	JGJ/4-L36GL
Продуктивність, м ³ /годину	2 500 000
Тиск на вході, МПа	0,2–5,6
Тиск на виході, МПа	5,8
Температура на вході, °С	40
Температура на виході, °С	60
Тип привода	газовий двигун WAUKESHA L36GL
Потужність двигуна, кВт	530
Розрахункові розміри компресорної установки, Д×Ш×В, мм (без шасі)	12 000×2 500×2 800
Вага установки, кг	30,000
Напівпричіп	МАЗ 938920-013, 33 тонни, тривісний
Автомобіль-тягач	КрАЗ-6443-0000040-03, колісна формула 6×6; двигун ЯМЗ-6582.10-12 (Євро-3, 330 к. с.)



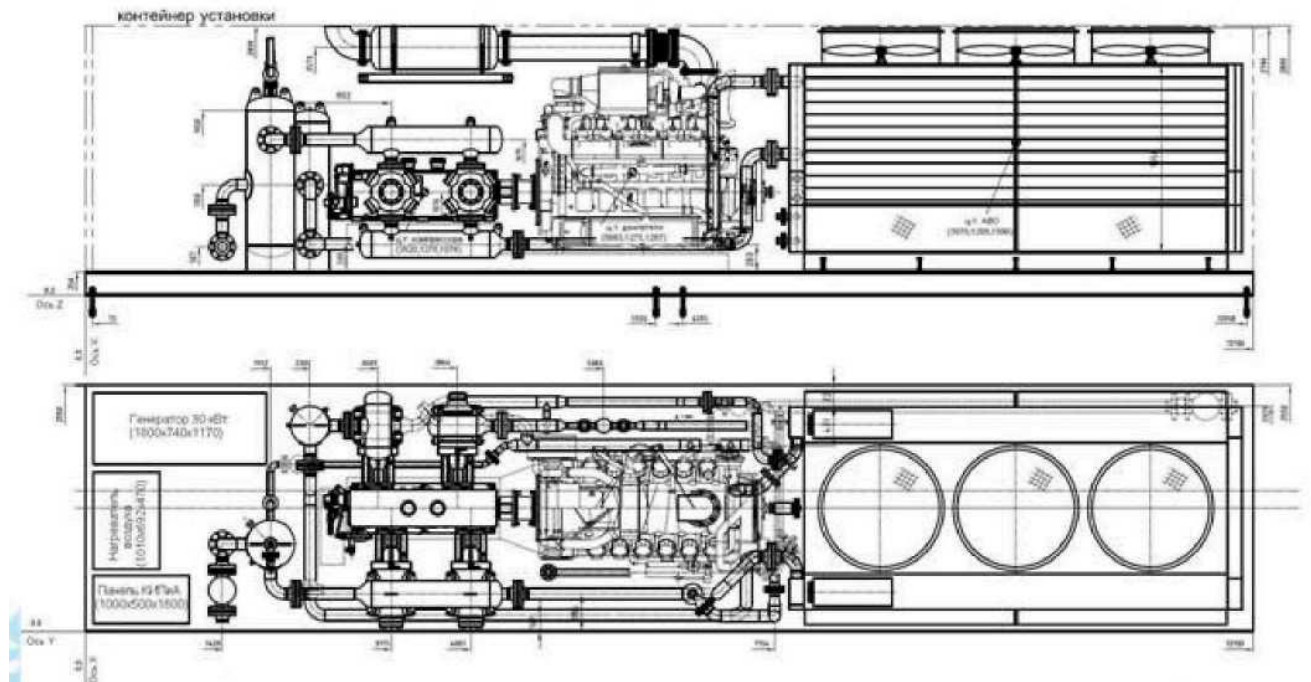


Рисунок 3.98 – Устаткування для видобування газу з магістральних газопроводів

3.7.4. Компресорна станція високого тиску для випробування трубопровідних арматур «Газпром» (БКУ-60/32 У1)

Установка блочно-компресорна БКУ-60/32 У1, призначена для вироблення стисненого якісного повітря і постачання ним різних пневматичних систем, пристроїв та механізмів у нафтовій, газовій та ін. галузях промисловості (рис. 3.99, табл. 3.13). Установка блочно-компресорна БКУ-60/32 У1 призначена для забезпечення технологічних потреб дослідного центру трубопровідного устаткування, матеріалів і технологій ВАТ «Газпром» для створення тиску на випробувальній ділянці трубопроводу.



Рисунок 3.99 – Загальний вигляд установки БКУ-60/32 У1

Таблиця 3.13 – Технічні параметри установки БКУ-60/32 У1

Найменування параметра	Од. вим.	Значення
Стисливе середовище		Атмосферне повітря
Об'ємна продуктивність установки щодо загальнопромислового повітря, зведена до нормальних умов (минаючи систему підготовки повітря)	м ³ /хв	60
Об'ємна продуктивність установки щодо підготовленого повітря, зведена до нормальних умов (після системи підготовки повітря з урахуванням втрат повітря на регенерацію)	м ³ /хв	51

Продовження таблиці 3.13

Найменування параметра		Од. вим.	Значення
Кількість повітря на регенерацію адсорбенту від продуктивності осушувача		%	15
Тиск повітря на виході з установки лінією низького тиску (з урахуванням перепаду тиску на фільтрах, осушувачі, трубопроводах)		кгс/см ²	10
Тиск повітря на виході з установки лінією високого тиску (з урахуванням перепаду тиску на фільтрах, осушувачі, трубопроводах)		кгс/см ²	320
Температура точки роси стисненого повітря		°С	-40
Клас чистоти повітря за ISO 8573-1:2001	за мех. домішками		1
	за маслом		1
Габаритні розміри			
Модуль компресора низького тиску	довжина – ширина – висота	мм	12 000 2 400 2 500
Модуль підготовки стисненого повітря	довжина – ширина – висота	мм	7 000 2 400 2 900
Модуль компресора високого тиску	довжина – ширина – висота	мм	5 000 2 400 2 500
Кількість модулів, усього		од.	5
– модуль компресора низького тиску		од.	1
– модуль підготовки стисненого повітря		од.	1
– модуль компресора високого тиску		од.	3
Маса модулів			
– модуль компресора низького тиску		кг	18 000
– модуль підготовки стисненого повітря		кг	7 000
– модуль компресора високого тиску		кг	10 500 · 3 = = 31 500
Напруга живлення		В	380/220/24
Споживана потужність			
– модуль компресора низького тиску		кВт	170 · 3 = 510
– модуль підготовки стисненого повітря		кВт	5
– модуль компресора високого тиску		кВт	185 · 3 = 555

Висота модуля компресора низького тиску зазначена без урахування важкого короба, що монтується на даху контейнера. При транспортуванні установки БКУ короб перебуває у від'єданому положенні. Висота установки БКУ з установленим коробом – 3 480 мм. Потужності модулів зазначені з урахуванням роботи всього устаткування (компресорів низького тиску 3 од., компресорів високого тиску (3 од.), адсорбційного осушувача, системи керування.

3.8. Утилізація та когенерація шахтного газу метану установками компресорними газоутилізаційними УКГ

3.8.1. Розроблення установок для добування, утилізації та використання шахтного метану

Розроблено схеми і установки для дегазації вугільних пластів та утилізації шахтного метану (рис. 3.100), а також системи автоматичного керування їх роботою. Заходи початкового захисту від вибуху служать для запобігання утворенню вибухонебезпечних газових сумішей. При перевищенні припустимих концентрацій система безперервного контролю концентрації і складу метану та наявності кисню в шахтному метані вимикає установку, щоб запобігти утворенню вибухонебезпечних газових сумішей.

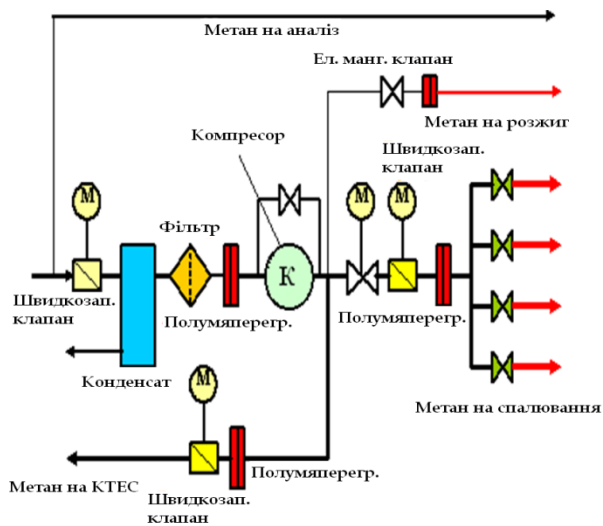


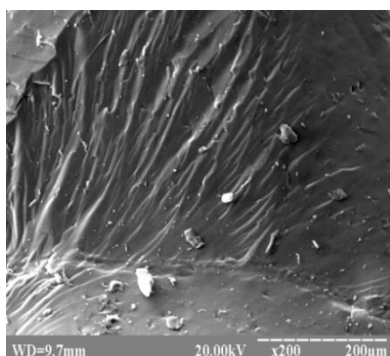
Рисунок 3.100 – Схема роботи установки для дегазації вугільних пластів, утилізації шахтного метану типу УКГ-5/8

Контейнерна газоутилізаційна установка (УКГ-5/8) призначена для утилізації шахтного газу діючих і закритих шахт шляхом його спалювання у спеціальній камері і запобігання виділенню в атмосферу шкідливого парникового газу – метану (CH_4). Установки можуть відкачувати газ безпосередньо із дегазаційної свердловини. Вибухозахищеність забезпечується конструктивними рішеннями за рахунок безперервного контролю вмісту метану. При концентрації метану 1 % установка вимикається. Використовуються вибухобезпечне устаткування і полум'яперегородки. Технічна продуктивність УКГ-5/8 обмежена

8 МВт теплової енергії, оптимальною тривалою потужністю 5 МВт. Установка здійснює постійний автоматичний аналіз газу, що надходить, на вміст CH_4 , O_2 і CO_2 . Відзначено, що метан у 21 раз більш шкідливий від вуглекислого газу, утвореного при його згорянні в установці.

Проаналізовано взаємозв'язок структури, проникності та сорбційні властивості вугілля, що містять метан (рис. 3.101). Зразки вугілля характеризуються наявністю розвиненої поверхні і мають пористу структуру з макро-, мікро- і нанопорами. Ця поверхня добре адсорбує метан. Розглянуто особливості структури вугілля, що являють собою природний полімерний матеріал в аморфному стані з розвиненою пористою структурою, повністю або частково заповнені флюїдами, які також перебувають і в міжмолекулярному просторі полідисперсного саморегульовального багатокомпонентного утворення, здатного до зміни своєї структури під впливом зовнішніх напруг та сорбованих газів.

а



б

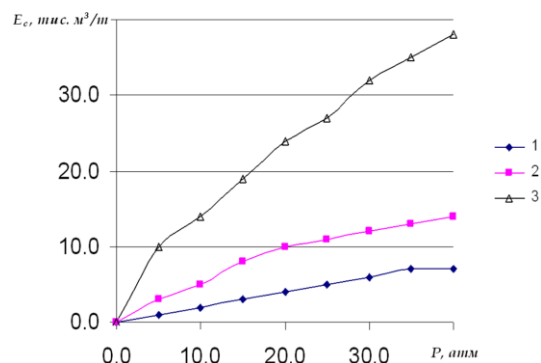
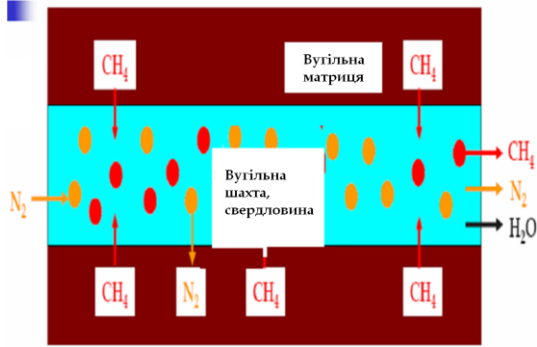


Рисунок 3.101 – Структура поверхні відколу вугілля (а) і залежності сорбційної ємності E_c різних газів (б) щодо тиску P : 1 – азот; 2 – метан; 3 – вуглекислий газ

Запропоновано модель впливу на вугільні пласти газів, що відрізняються енергією сорбції, і можливі схеми інтенсифікації метановіддачі вугільних пластів (рис. 3.102).

а



б

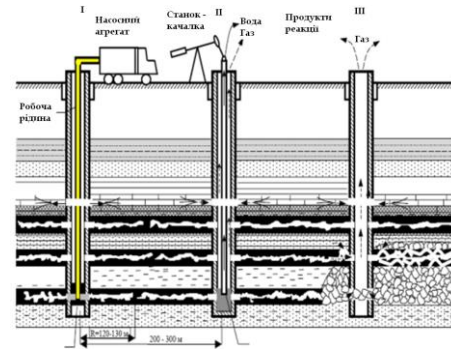
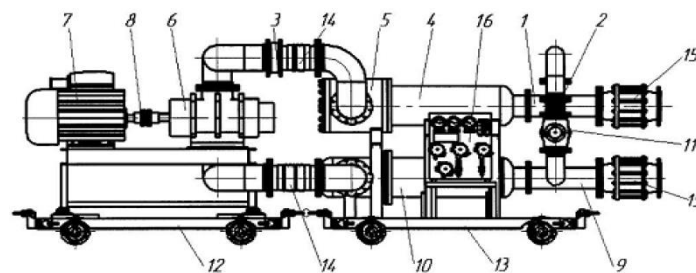


Рисунок 3.102 – Модель впливу газів на вугільні пласти (а) і можлива схема інтенсифікації метановіддачі вугільних пластів (б) із використанням мембранних азотних станцій

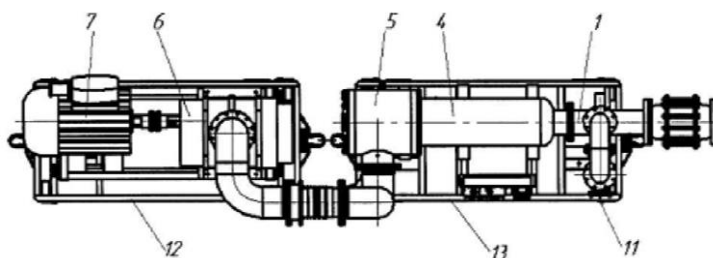
3.8.2. Установа для дегазації підземних пластів

Розроблено установку для дегазації підземних пластів (рис. 3.103). Працює установка для дегазації підземних пластів у такий спосіб. Платформи 12 і 13 установки окремо доставляють у простір шахти, підвозять до робочої зони, з'єднують гнучкі рукави 14. Вхідний патрубок 1 під'єднують до лінії зв'язку зі свердловиною, через яку здійснюють дегазацію підземного пласта, а патрубок 9 – до лінії відведення (на рис. не показано). При увімкненні привода 7 роторного компресора 6, що з'єднаний зі зворотним клапаном 3, глушником 4 на всмоктуванні і всмоктувальному фільтрі 5, роторний компресор 6 зазначеною лінією забезпечує відкачування суміші газів, що утримуються в оброблюваних підземних пластах, унаслідок чого забезпечується дегазація зазначених пластів без традиційних для цього процесу явищ утворення кристалогідратів із метаном, які раніше в аналогах перекривали проточні канали устаткування установок і обмежували період її застосування.

а



б



в

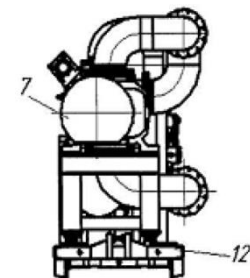


Рисунок 3.103 – Установа для дегазації підземних пластів: а – фронтальний вигляд; б – вигляд зверху; в – вигляд збоку

3.8.3. Станція для утилізації шахтного газу

Розроблено станцію для утилізації шахтного газу. На рисунку 3.104 схематично зображений блок для спалювання шахтного газу станції та його утилізації.

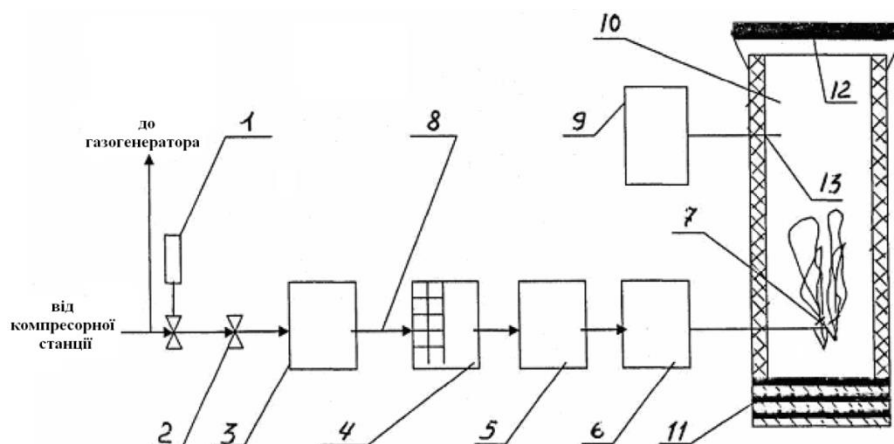


Рисунок 3.104 – Блок для спалювання шахтного газу

Блок для спалювання шахтного газу працює так. Шахтний газ, рухаючись від компресорної машини трубопроводом 8, проходить клапан регуляції витрати газу, що автоматично відкривається при подачі живлення на розподільну шафу блока спалювання шахтного газу, потім проходить аварійний клапан 2, потрібний для ручного перекриття трубопроводу в аварійній ситуації і повинен бути постійно відкритий під час роботи блока. Далі шахтний газ проходить через пристрій для гасіння полум'я 3, що складається з набору стрічок із високоякісної сталі, і потрапляє в блок вимірювання тиску і температури шахтного газу 4, показання якого служать для регулювання подачі об'єму шахтного газу. Далі шахтний газ минає блок реле 5, що складається із двох реле тиску (max/min), які стежать за вихідним тиском пальників. Рухаючись, шахтний газ потрапляє в магнітну систему 6, що складається з набору кільцевих магнітів (на рис. не показано), виготовлених, наприклад, із фериту барію, які мають залишкову індукцію не менше 0,1 Тл, установлену в трубопроводі зі слабомагнітної сталі, розміщену на вході розподільної ділянки трубопроводу із запальним пальником і чотирма основними пальниками 7 (отвори пальників мають, наприклад, гвинтоподібну форму для закручування потоку горючого газу і його більш ефективного перемішування з повітрям у факелі горіння), причому кільцеві магніти мають знакозмінне розміщення своїми полюсами, а канали для проходження газової суміші виконані в окремих трубках, що забезпечують відсутність безпосереднього контакту газу з магнітами. Зрештою, шахтний газ потрапляє в камеру спалювання 10, що складається зі стола камери спалювання 11, даху камери спалювання 12, яка, щоб уникнути руйнування від впливу високої температури горіння, обладнана із середини захисною теплоізоляцією. Для контролю оптимізації процесу горіння камера спалювання оснащена газоаналізатором випускних газів 9 зі щупом 13.

Основні етапи розроблення установок компресорних газоутилізаційних УКГ передбачали:

1. Розроблення й затвердження у ВАТ «Краснодонвугілля» технічного завдання на встановлення компресорної газоутилізаційної установки УКГ-5/8.

2. Розроблення програми і методики попередніх та приймальних випробувань.

3. Одержання висновку експертизи Донецького експертно-технічного центру Держгірпромнагляду України про відповідність устаткування вимогам нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки.

4. Проведення приймальних випробувань дослідного зразка установки на ВАТ «Шахта Комсомолець Донбасу».

5. Розроблення і узгодження Технічних умов.

6. Одержання висновку експертизи Донецького експертно-технічного центру Держгірпромнагляду України про відповідність устаткування підвищеної небезпеки вимогам нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки.

7. Експлуатацію та широке впровадження на шахтах України компресорних газоутилізаційних УКГ.

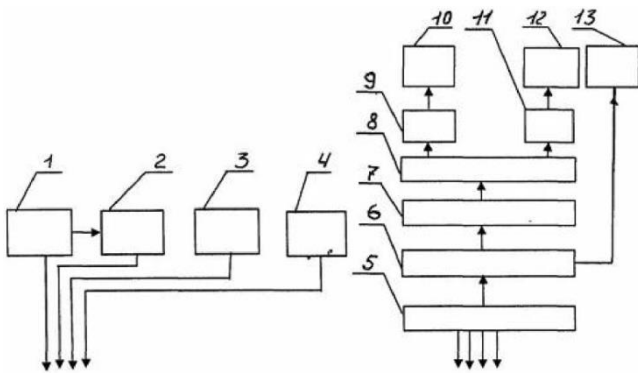


Рисунок 3.105 – Технологічний ланцюг способу видобування метану

3.8.4. Спосіб видобування метану

На рисунку 3.105 схематично зображено технологічний ланцюг, за допомогою якого здійснюється спосіб видобування метану. Технологічний ланцюг містить нагнітальний насос – 1, гідроаккумулятор – 2, балони з вуглекислим газом і/або установку для одержання вуглекислого газу – 3, балони з азотом і/або азотну станцію з пристроєм для підігрівання (на рис. 3.105 не показаний) – 4, газозбірний колектор – 5, ежектор – 6, систему очищення й осушення метанової суміші – 7, систему збагачення метанової суміші – 8, компресор – 9, ємності для метану – 10, компресор – 11, енергетичну установку – 12, утилізаційну установку – 13.

Спосіб реалізується за допомогою такого технологічного ланцюга устаткування: нагнітального насоса 1, що створює гідравлічні удари і одночасно накопичує гідравлічну енергію потоку, гідроаккумулятора 2, що після завершення гідроімпульсної обробки пласта використовується для подачі у пласт робочої рідини під високим тиском, балонів 3 із вуглекислим газом або установки для одержання вуглекислого газу для накачування у вугільний пласт вуглекислого газу, що унаслідок більшої сорбційної здатності, ніж у метані, витісняє адсорбований вугіллям метан, балонів 4 з азотом або азотної станції (із пристроєм для нагрівання газу, наприклад, до температури 160–170 °С для найкращої адсорбції метану) для відтискування азотом, що перешкоджає самозайманню ву-

гілля, а також зменшує ймовірність підривних процесів при видобуванні метану, газозбірного колектора 5, що з'єднує свердловини в зоні кам'яновугільного пласта, ежектора 6, що здійснює підняття тиску низькопотенціального газу для подальшого його переміщення, системи очищення й осушення метанової суміші 7 для подальшого використання як енергетичного палива, системи збагачення метанової суміші 8 для підняття енергетичного потенціалу палива, компресорів 9, що стискають метан у ємності, спрямовують до енергетичних установок, ємностей, що використовуються для зберігання метану 10, енергетичних установок 12, наприклад, газопоршневих електрогенераторів, утилізаційних установок 13, наприклад, установок для спалювання метану.

3.8.5. Розроблення установок для утилізації метану УКГ

Концерн «НІКМАС» упродовж останнього десятиліття розробив і освоїв виробництво установок для технології утилізації метану – добування, компримування й підготовки для використання в енергетиці. У 2008 році була виготовлена перша в Україні партія компресорних газоутилізаційних установок УКГ-5/8 для видобування й утилізації шахтного метану на діючих та закритих шахтах. Установа УКГ-5/8 призначена для спалювання його у спеціальній камері, запобігання виділенню в атмосферу або подачу на устаткування для енергетичного застосування (одержання електрики і тепла). Установки пройшли ви-

пробування і знайшли застосування на ряді шахт України (рис. 3.106).



Рисунок 3.106 – Зовнішній вигляд компресорної газоутилізаційної установки УКГ-5/8

Устаткування установки розміщується у сталевому 20-футовому ізотермічному контейнері, виконаному в шумозаглушеному варіанті. Контейнер захищає устаткування від механічних пошкоджень і впливу навколишнього середовища. Установку можна переміщати на об'єкт автотранспортом, уведення її в експлуатацію на території вугільного родовища не вимагає значних капітальних витрат. Установка оснащена системою віддаленого моніторингу, що забезпечує можливість дистанційного керування мережею установок, розташованих на родовищі.

Інтерес становить застосування технологій очищення газів від складових, що не згоряють. Концерн «НІКМАС» освоює виготовлення установок для поділу газів із застосуванням сучасних мем-

бранних технологій. У конструкції устаткування для збагачення метану впроваджені новітні наукові й технічні досягнення, у результаті чого устаткування має технічні характеристики, що не поступаються іноземним аналогам. Технологія збагачення і денітрифікації метану на полімерних мембранах дозволяє одержати газ, що відповідає сучасним вимогам щодо палива. Схема поділу газів при збагаченні метану наведена на рис. 3.107.

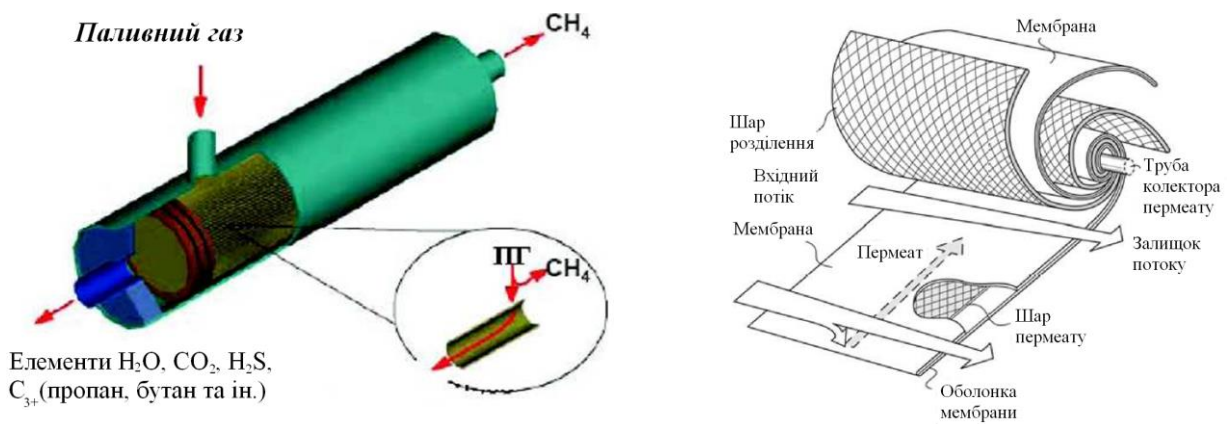


Рисунок 3.107 – Схема поділу газів у мембранному блоці

Сьогодні основним способом відділення азоту від метану вважався криогенний (поділ на фракції за низьких температур). Однак останнім часом активно впроваджується спосіб денітрифікації газів (відповідно збагачення метану) шляхом поділу на мембранах, оскільки молекули азоту і метану порівнянні за розмірами, а звичайні полімерні мембрани не в змозі їх розділити. Для вирішення цієї проблеми були розроблені мембрани із силіконовим шаром поділу, у яких процес поділу відбувається через різні швидкості поглинання (сорбції), а не за швидкістю проникнення (дифузії) молекул азоту і метану.

Газ під тиском спрямовується в силіконовий шар, розчиняється в ньому та проникає на протилежну поверхню, де повторно виділяється і рухається у вигляді газу. Обидва гази (азот і метан) швидко проникають через розділовий шар, але вони мають різні швидкості розчинення (поглинання) у силіконі, тому така мембрана може їх ефективно розділити.

Кожний модуль містить від 20 до 50 м² площі мембранної поверхні. На рис. 3.108 у розрізі зображений шар мембрани. Найтонший шар – це сепараційний силіконовий шар. Під ним розміщена хімічно стійка пориста основа, що не перешкоджає масоперенесенню. Ще нижче перебуває поліефірний шар для забезпечення механічної міцності. Як приклад застосування мембран цього типу розглянемо схему установки для денітрифікації природного газу. Структурна схема мембранної установки наведена на рис. 3.109.

Технічні дані установки: продуктивність за газом – 50 тис. нм³/добу (2 083 м³/годину); тиск газу на вході в установку – 1,8 МПа; необхідний вміст азоту на виході з мембран – 10 %. У розглянутій установці використовуються два мембранних вузли. Потік газу 1, що містить близько 38 % азоту, змішується з потоком газу 2 (пермеат із першого мембранного вузла). Пермеат (фільтрат) – суміш газів, що утворилася після проходження газів крізь мембрану. Перед змішуванням потік 2 стискається компресором 1 до робочого тиску 1,8 МПа. Потік 3, що являє собою суміш потоків 1, 2, 20 (ретентат – потік, не пропущений мембраною), спрямовується на перший мембранний вузол. Цей потік уже містить 35,3 % азоту і 62 % метану. Потік 3 розділяється в мембранному вузлі на потік 2 (ретентат повертається у перший мембранний вузол), потік 15 (ретентат, що містить > 78 % азоту, розглядається як непридатний газ і видаляється із системи) і потік 7 (який є одним і компонентів живлення другого мембранно-

го вузла). Потік 7 і потік 16 (пермеат із другого мембранного вузла) повторно стискаються від тиску 0,17 до 1,93 МПа за допомогою компресора 2. Одержаний у результаті газовий потік 12 містить > 76 % метану і < 19 % азоту. У результаті поділу на другому мембранному вузлі утворюються три газові потоки: 16 – повертається на другий мембранний вузол; 20 – повертається на перший мембранний вузол; 18 – вироблений на установці газподається споживачеві, що містить > 82 % вуглеводнів і < 10 % азоту.

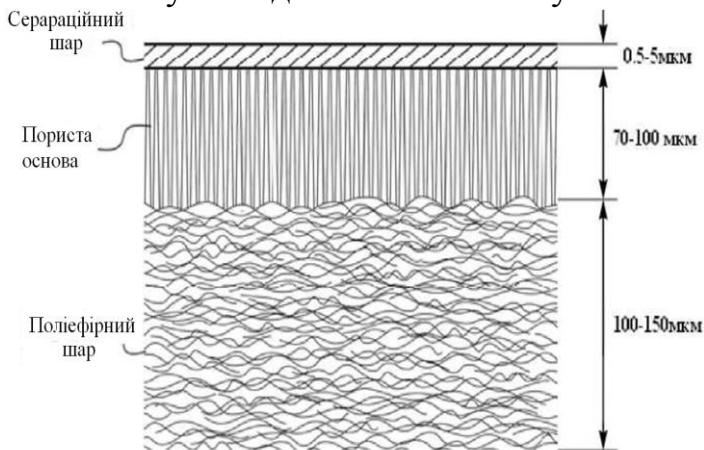


Рисунок 3.108 – Схема структури мембрани і загальний вигляд мембранних модулів

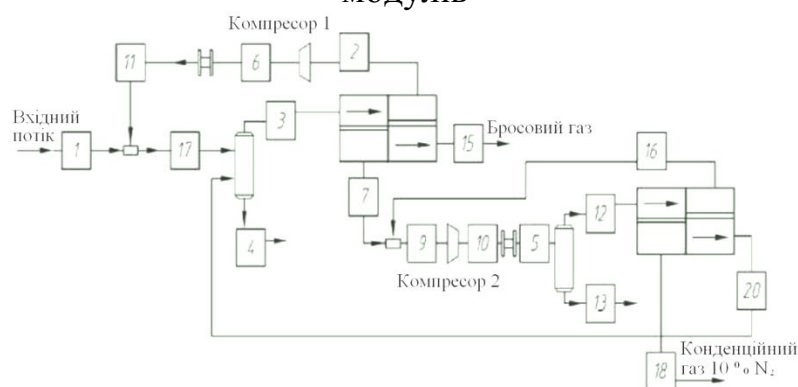


Рисунок 3.109 – Структурна схема мембранної установки

У табл. 3.14 розглянутий докладний баланс одержуваних газових потоків із наведенням робочих температур, тисків, витрат, а також об'ємного вмісту компонентів: азоту, метану, етану та ін.

Таблиця 3.14 – Характеристика газових потоків

Номер потоку	1	3	2	15	9	12	16	20	18
Найменування	Подача	Вхід мембр.	Всмоктування компр.		Всмоктування компр.	Вхід мембр. II	Повернення	Повернення	Продукт
Масова витрата, кг/годину	2 018,68	6 740,87	3 711,38	971,061	2 415,11	2 415,11	356,681	1 011,03	1 047,36
Температура, °C	25,0000	40,8304	34,3200	30,4951	40,1002	48,8889	43,4361	42,3242	46,7187
Тиск, кгс/см ²	18,3549	18,3549	1,758	17,4409	17,58	19,686	1,758	19,334	1,758

Продовження таблиці 3.14

Номер потоку	1	3	2	15	9	12	16	20	18
Найменування	Подача	Вхід	Всмоктування		Всмоктування	Вхід	Повернення	Повернення	Продукт
		мембр.	компр.		компр.	мембр. II			
Мольна частка пари	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
Рівні нагрівання (15 °C)									
Загальний, кДж/(кг моль)	5,927E+005	5,955E+005	5,894E+005	1,909E+005	7,604E+005	7,604E+005	8,008E+005	6,238E+005	8,718E+005
Робочий, кДж (кг моль)	5,350E+005	5,368E+005	5,31E+005	1,719E+005	6,859E+005	6,859E+005	7,222E+005	5,620E+005	7,874E+005
Об'ємний потік, м ³ /добу	3010,3447	111,172061	64202,3789	1346,2489	45042,5391	4059,5610	7027,4233	1650,8524	20229,9883
Рідина, м ³ /годину	4,4376	154,163	8,549	1,4762	6,3872	6,3872	1,0021	2,4258	2,9593
Пара, м ³ /добу	49 999,9961	174338,8125	97 191,5859	20517,4922	66967,7500	66967,7500	10338,1746	27163,7695	29465,8105
Компоненти, %									
Метан	57,441002	62,398046	63,507915	21,359169	76,427758	76,427758	82,272816	67,611682	82,504302
Етан	2,156000	1,273435	0,913640	0,032968	2,355045	2,355045	2,435469	0,936469	3,634576
Пропан	1,045000	0,488764	0,273830	0,002850	1,009876	1,009876	0,879392	0,233890	1,771017
N-бутан	0,259000	0,097362	0,036212	0,000059	0,219474	0,219474	0,120381	0,018596	0,439425
1-Бутан	0,225000	0,084581	0,031459	0,000052	0,190663	0,190663	0,104578	0,016155	0,381740
N-пентан	0,061000	0,021578	0,007009	0,000006	0,050403	0,050403	0,023456	0,003061	0,103501
1-Пентан	0,082000	0,029936	0,010179	0,000011	0,068440	0,068440	0,034221	0,004783	0,139130
Неопентан	0,003000	0,001095	0,000372	0,000000	0,002504	0,002504	0,001252	0,000175	0,005090
N-гексан	0,116000	0,040363	0,011493	0,000006	0,094334	0,094334	0,038461	0,004419	0,196827
Азот	38,040000	35,253853	34,997559	78,596145	18,995459	18,995459	13,538325	30,981955	9,860071
Діоксид вуглецю	0,562000	0,300012	0,199531	0,005313	0,572762	0,572762	0,537301	0,177309	0,949763
Кисень	0,010000	0,010680	0,010802	0,003443	0,013284	0,013284	0,014344	0,011503	0,014555



Рисунок 3.110 – Мембранний модуль збагачення метану

На рисунку 3.110 показаний приклад скомпонованого на загальній рамі мембранного модуля для денітрифікації. При капітальних витратах на установку, що передбачають вартість компресорних установок, мембранних модулів, системи осушення і очищення газу, їх окупність становить у середньому від 2,3 до 3 років. Сфери застосування мембранних систем поділу різні, зокрема це підготовка паливних газів для генераторів та двигунів; поділ попутних газів; денітрифікація газів; очищення газів від CO₂ і H₂S.

3.8.6. Застосування технології та устаткування для підвищення метановіддачі вугільних пластів

Забезпечення енергоефективності виробництва, підвищення конкурентоспроможності товарної продукції гірничодобувних підприємств з одночасним зниженням техногенного впливу на довкілля є найважливішими проблемами. Відомо, що світові запаси метану вугільних пластів перевищують запаси природного газу й оцінюються в 260 трлн м³. На частку України припадає близько 12–25 трлн м³.

У видобутку метану вугільних пластів лідером є США, де буріння свердловин у вугільних басейнах «Сан-Хуан» і «Блек» було розпочате у 80-х роках минулого століття. У Канаді, у провінції Британська Колумбія, найближчим десятиліттям планується реалізувати 10 проектів з експлуатації покладів газу вугільних пластів. У США газ вугільних пластів вважається нестандартним джерелом природного газу, а в Китаї ситуація є зовсім протилежною. Там п'ять найбільших газових родовищ співвідносяться з ресурсами вугільних родовищ західної частини Китаю, розвідані запаси яких становлять 67,8 % від сумарних ресурсів газу всієї країни. Зазначимо, що останніми роками в Росії коефіцієнт добування метану з вугільних родовищ засобами дегазації, як правило, не перевищував 0,25. Ступінь добування метану залежить від застосовуваних способів.

Вважається, що найбільш ефективним заходом щодо зниження виділення метану в гірничі виробки шахт є дегазія вугільних пластів і колекторів природних скупчень вільного газу через свердловини, пробурені із земної поверхні або з підземних виробок. Характеристики відомих методів інтенсифікації метановіддачі вугільних пластів наведені в табл. 3.15.

Таблиця 3.15 – Відомі традиційні методи інтенсифікації метановіддачі вугільних пластів

Метод інтенсифікації	Умова застосовності	Частота використання
Гідророзрив вугільних шарів	У різних геологічних умовах	> 85 %
Кавітація (пневмо-гідродинамічний вплив)	Вугільні пласти сумарною потужністю більше 20 м в інтервалі залягання до 100 м, проникністю більше 30 мД. Пластовий тиск вищий від гідростатичного	< 10 %
Розширення відкритого вибою свердловини	Високопроникні вугільні пласти проникністю від 100 мД і більше	< 5 %
Похило спрямоване і горизонтальне буріння	Низькопроникні вугільні пласти потужністю > 2 м	1 %

Очевидно, уявлення про метан у вугільних пластах, динамічних і газодинамічних явищах вимагають уточнення. Деякі вчені доводять, що вугільні пласти нижче від межі зони газового вивітрювання непроникні в режимі фільтрації. Необхідно зазначити, що метан у вугільних пластах утримується в різних формах: 10 % – у вільній, тобто у властиво газовій формі, а 90 % – у пов'язаному з

вугіллям стані, в адсорбованому на поверхні вугіллі, тріщин, пор або у формі твердого розчину.

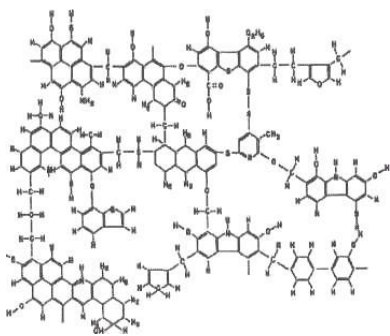


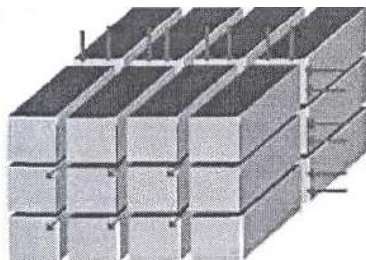
Рисунок 3.111 – Одна з можливих структур молекул вугілля

Вугілля можна представляти як полідисперсне саморегульовальне багатокомпонентне утворення, здатне до зміни своєї структури під впливом зовнішніх напруг та сорбованих газів, що є своєрідним високомолекулярним природним полімером із розвинутою пористістю й адсорбованими на поверхні, а також розчиненими в міжмолекулярному просторі молекулами метану та інших газів. Поряд із цим варто враховувати

метан, розчинений у воді. Наприклад, вода з глибини 700 м може містити розчинений метан обсягом, у 1,5 раза більшим від її об'єму. Молекулярна структура вугілля подана на рис. 3.111.

Модель будови блоків вугілля і тріщинувата структура вугілля показані на рис. 3.112.

а



б

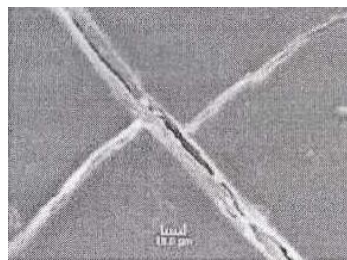


Рисунок 3.112 – Відома модель будови блоків вугілля і переміщення газів у ньому (а); тріщинувата структура вугілля (б)

Пропонована технологія базується на використанні бінарних газів, зокрема CO_2 й азоту, закачуваних у вугільні пласти у відомих об'ємах, пропорціях, послідовності, заданих значеннях тиску, часу витримки, а також при подальшому використанні газів, що добуваються. Фізичним фактором ефективності пропонованої технології є розбіжності у величинах енергії сорбції вугіллям різних газів. Зазначимо, що нагнітання CO_2 може викликати розбухання вугілля. Але з цією проблемою можна впоратися стандартними методами, наприклад, проведенням гідророзриву пласта.

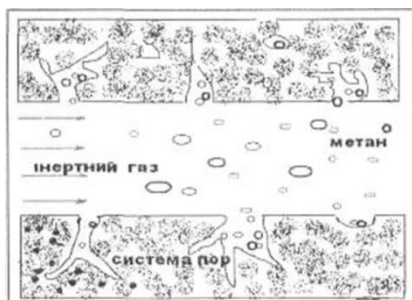


Рисунок 3.113 – Модель витиснення метану азотом

Значний інтерес до цих технологій проявляють у США, Англії, Німеччині, Китаї, Канаді, Австралії, Японії та інших країнах. Зазначимо, що однією з причин того, що польові проекти не стали економічними, є відносно висока вартість CO_2 . Тому ми припускаємо як варіант використовувати CO_2 теплових електростанцій. Деякі інші відомості про використання нового методу наведені в табл. 3.16.

Модель дії витиснуваного азоту наведена на рис. 3.113. При накачуванні азоту зменшується

парціальний тиск метану у вільному просторі (свердловині, шахті), і метан виходить із пористої системи вугілля. Оскільки енергія сорбції молекул CO₂ вугіллям більше, ніж молекул CH₄, то на поверхні вугілля з часом сорбується CO₂, а метан десорбується і, виходячи у вільний простір, проноситься потоком азоту.

Таблиця 3.16 – Відомості про технологію збільшення метановіддачі накачуванням CO₂ й азоту

Характеристика публікації	Країна	Джерело
Розвиток партнерського проекту Японії й Австралії із використання накачування CO для збільшення метановіддачі вугільних пластів	Японія, Австралія	Project. CFE-06-13: CO ₂ Enhanced Coal Bed Methane (CSIRO-JCOAL-ECBM)
Проект накачування парникового газу CO ₂ у глибокі вугільні пласти й одночасне підвищення метановіддачі	Канада	Shannon D. Phelps and all.//Coal bed methane ownership and responsibility: a summary of surface, mineral, and split-estate rights
Проект утилізації C ₂ від теплових електростанцій на вугіллі (вартість – 1,3 млн дол.)	США	–
Проект використання канадської технології для збільшення метановіддачі накачуванням CO ₂ й азоту	Китай	Project No. A-030841. Development of china's coalbed methane technology/ CO ₂ sequestration project
Економічні й технічні аспекти накачування CO ₂ , розглянуті в пілотному проекті на прикладі басейну SanJuan (США)	США	Economics of using enhanced recovery of coalbed methane for carbon management.//Coal-Seq 11 Forum. Washington -2003
Інформація про програму США з використання технологій, що зменшують викид метану в 20 разів	США	http://www.adv-res.com/Research.asp#Outreach
Техніко-економічне обґрунтування накачування CO ₂ для збільшення виходу метану	США	Topical report January 1, 2004-march 31, 2004 //U.S. Department of Energy. DE-FC26-00NT40924
Комп'ютерне моделювання накачування CO ₂ й азоту у вугільні пласти	США	Wo, Shaochangl University of Wyoming, Laramie, WY . //Simulation of N ₂ /CO _a Injection in Coal Beds: Lessons Learned from Tiffany Field Case Study
Комп'ютерне моделювання накачування CO ₂ й азоту у вугільні пласти Польщі. Зроблено висновок про придатність накачування 10 ⁴ т упродовж 1 року. При цьому можна спостерігати результат через 18 місяців після накачування CO ₂	США	U.S. Department of Energy. Award Number DE-FC26-00NT40924
Моделювання збільшення метановіддачі накачуванням CO ₂ й азоту	Канада	New development on coalbed methane simulators for enhanced coalbed methane recovery and CO ₂ storage. //2002 Denver Annual Meeting (October 27–30, 2002)
Економічний аналіз, моделювання накачування CO ₂ і збільшення метановіддачі. Після застосування CO ₂ об'єм пласта вугілля збільшується	США	The Allison Unit CO ₂ -ECBM Pilot – A Reservoir and Economic Analysis. // International coal bed methane symposium, 2005
Показано, що при десорбції газу змінюються проникність і пористість вугілля. Зміна в проникності, пов'язаної з матричною усадкою, була лінійно пропорційна об'ємній напрузі або об'єму десорбованого газу	США	Influence of gas production induced volumetric strain on permeability of coal. // Geotechnical and Geological Engineering. Volume 15, Number 4 / December, 1997.– P. 303–325

Після накачування газів, що витісняють метан, відбуваються його переміщення в блоках, тріщинувато-пористому середовищу і дифузія у вугіллі. Молекули метану сорбуються поверхнею вугілля, на якій може бути наявний шар води. Вони можуть десорбуватися при нагріванні, зниженні тиску, додаванні в газове середовище інших газів із більш високим значенням енергії сорбції. Зміна тиску після накачування газів забезпечує появу дифузійного потоку. При

цьому щільність дифузійного потоку можна навести у вигляді відомого співвідношення

$$J = -D \left(\frac{dc}{dx} \right),$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\frac{dc}{dx}$ – градієнт концентрації.

Зазначимо, що величина коефіцієнта дифузії у вугіллі має значний розкид. При цьому коефіцієнт дифузії залежить від розмірів дифундувальних молекул, особливостей взаємодії їх із фрагментами макромолекул, рухливості полімерних ланцюгів, вільного об'єму, а також від неоднорідності структури вугілля.

Просторово-часовий розподіл концентрації

$$\frac{dc}{dx} = \frac{d}{dx}(-J) = \frac{d}{dx} D \frac{dc}{dx}.$$

Тривимірний дифузійний процес $[c(x, y, z, t)]$ описується рівняннями

$$J = -D \operatorname{grad} c,$$

$$\frac{dc}{dx} = \frac{d}{dx} \left(D \frac{dc}{dx} \right) + \frac{d}{dy} \left(D \frac{dc}{dy} \right) + \frac{d}{dz} \left(D \frac{dc}{dz} \right).$$

Розглянемо перенесення газів через наскрізні пори у вугіллі. При відносно малих тисках газу або розмірах пор (r_0), коли частота зіткнень молекул газу зі стінками пор перевищує частоту взаємних зіткнень молекул, тобто середня довжина їхнього вільного пробігу $l \gg r_0$, спостерігається так звана кнудсенівська дифузія. При цьому газовий потік пропорційний середній швидкості молекул і константа газопроникності визначається з рівняння

$$\Pi = \frac{8r_0 N_A \pi}{3N_A} (2\pi mkT)^{-1/2},$$

де Π – поверхнева щільність пор у кути.

Оскільки середня швидкість молекул обернено пропорційна квадратному кореню з їхніх мас ($\Pi = 1/\sqrt{m}$), компоненти поділюваної газової суміші проникають через пори з різними швидкостями; у результаті суміш, що пройшла через перегородку, збагачується більш легкими компонентами. Зі збільшенням тиску газу в таких пористих системах зростає поверхнева концентрація молекул, адсорбованих на стінках пор. Адсорбційний шар, що утворився, може виявитися рухливим і переміщатися уздовж поверхні пори, внаслідок чого паралельно з об'ємним дифузійним перенесенням у ній можлива поверхнева дифузія газу.

Розглянемо найпоширеніші моделі (рис. 3.114) і рівняння ізотерм адсорбції.

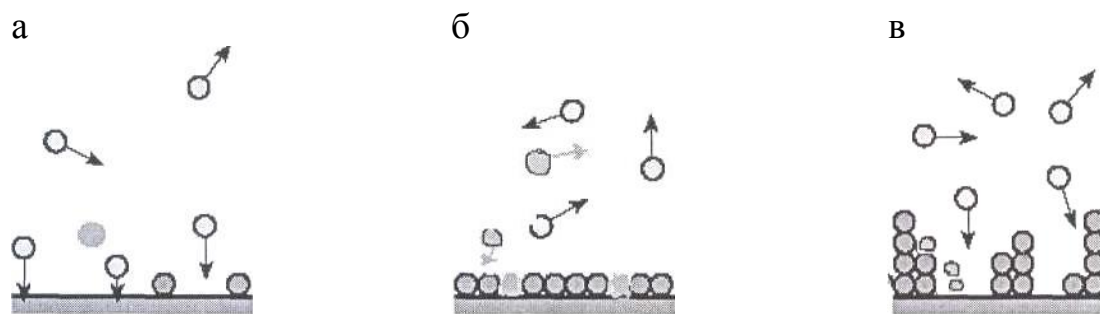


Рисунок 3.114 – Модельні подання про розподіл молекул на поверхні вугілля: а – модель може бути інтерпретована рівнянням Генрі; б – модель Ленгмюра; в – модель БЕТ

Модель Ленгмюра. Основні положення, покладені в основу виведення ізотерми адсорбції, відповідно до моделі Ленгмюра випливають із того, що: поверхня адсорбенту однорідна, тобто теплота адсорбції на різних ділянках поверхні однакова; теплота адсорбції не залежить від наявності інших адсорбованих молекул, отже, можна знехтувати взаємодією адсорбованих молекул між собою; молекули не можуть адсорбуватися на молекулах першого шару, і максимальна адсорбція спостерігається при щільному упакованні адсорбованих молекул на поверхні в шарі товщиною в одну молекулу. Адсорбовані молекули перебувають у динамічній рівновазі з молекулами в газовій фазі. Така модель приводить до відомого рівняння ізотерми Ленгмюра:

$$a = a_m \frac{Kp}{1 + Kp},$$

де K – константа адсорбційної рівноваги; a_m – максимальна адсорбція.

В області малих тисків рівняння Ленгмюра переходить у рівняння ізотерми Генрі:

$$a = K_G p, \text{ де } K_G = Ka_m.$$

Модель БЕТ. Відомі теорія полімолекулярної адсорбції Брунауера, Еммета і Теллера (БЕТ), що базується на моделі адсорбційного процесу, запропонованій Ленгмюром. У моделі БЕТ врахована можливість полімолекулярної адсорбції.

Передбачається, що для реалізації запропонованої технології можуть використовуватися розроблені концерном «НІКМАС» пересувні азотно-мембранні компресорні станції, а також контейнерні газоутилізаційні установки. Приведення в дію компресорної станції продуктивністю 1 000 $\text{нм}^3/\text{годину}$ здійснюється від електродвигуна потужністю 315 кВт. Переваги мембранного способу одержання азоту обумовлені низькою собівартістю його одержання, більшим ресурсом газороздільних мембранних установок.

Створена установка газоутилізаційна типу КГУУ входить до комплексу устаткування для добування метану з вугільних пластів (шахта «Молодогвардійська»). Параметри газоутилізаційної установки наведені в табл. 3.17. Контейнерна газоутилізаційна установка КГУУ (рис. 3.115) призначена для утилізації шахтного газу шляхом його спалювання і запобігання таким чином виділенню в атмосферу шкідливого парникового газу – метану.

Таблиця 3.17 – Характеристики контейнерної газоутилізаційної установки (КГУУ)

Робоче середовище	Шахтний газ (25 % і більше CH ₄)
Продуктивність, м ³ /годину	570–1551
Перепад тиску, кгс/см ² , не більше	0,1
Споживана номінальна потужність, кВт, не більше	60
Напруга живлення, В, не більше	400
Теплова потужність номінальна, мВт, не менше	5
Температура спалювання газу, °С, не більше	1 200
Габаритні розміри контейнера, мм, не більше довжина – ширина – висота	6 000–2 650–2 750
Маса контейнера з устаткуванням, кг, не більше	11 000
Габаритні розміри труби, мм, не більше: діаметр – висота	2 100–5 400
Маса труби, кг, не більше	2 000

Відомі дані іноземних авторів, що ілюструють ефективність методу, наведені на рис. 3.116. Дифузійні процеси, що відбуваються, супроводжуються заміщенням метану на молекули газів, що закачуються, підвищуючи тим самим ступінь добування метану при дегазації вугільних пластів.



Рисунок 3.115 – Зовнішній вигляд контейнерної газоутилізаційної установки

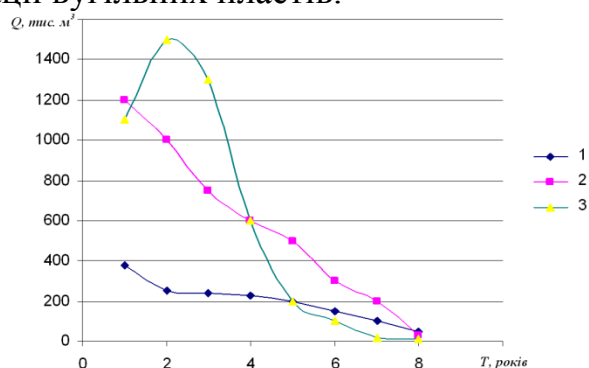


Рисунок 3.116 – Прогнозована залежність метановіддачі вугільного пласта від часу після накачування газів: 1 – без накачування; 2 – накачування азоту; 3 – накачування CO₂

Економічна доцільність великомасштабного промислового видобутку метану на вуглегазових родовищах підтвердилася у ході розвитку вуглегазових промислів у США і результатами робіт в Австралії, Китаї та інших країнах. Наприклад, за замовленням Департаменту енергетики США в наукових і дослідних розробленнях (2004) почали застосовувати азот для підвищення метановіддачі вугільних пластів. При цьому виконано ТЕО доцільності використання бінарних газів, одним із яких є азот. Корпорації «Petromin Resources» і «China United Coalbed Methane Co» запланували за п'ять років провести дослідження застосування CO₂ для підвищення метановіддачі вугільних пластів.

ВАТ «Газпром» готує розпочати промислове розроблення шахтного метану в Кузбасі. Початок у 2007 р. спільних робіт канадською і китайською компаніями («Petromin Resources» і «China United Coalbed Methane Co») дає ім-

пульс синхронному виконанню аналогічного проекту спільно з інститутами НАН України, галузевими інститутами і концерном «НІКМАС». Автори проекту мають «ноу-хау» за запропонованою технологією.

Вирішення цих проблем сприяє збільшенню обсягів видобування вугілля і зниженню його собівартості, збільшенню повноти і комплексності використання енергетичного палива, підвищенню безпеки підземного вуглевидобування в умовах зростання природного вмісту метану у вугільних пластах, поліпшенню екологічних показників за рахунок обмеження викидів метану в атмосферу. Пропоновані розробки компресорних машин і устаткування сприяють впровадженню комплексного технічного, технологічного та економічного підходу до підвищення ефективності гірничорудної галузі.

3.9. Нові технології вироблення пневмоенергії в підземних умовах шахт за допомогою компресорів ВВ і УКГШ

3.9.1. Гвинтова шахтна компресорна установка

Створено гвинтову шахтну компресорну установку. На рисунку 3.117 зображено пневмогідралічну схему гвинтової компресорної установки, а на рис. 3.118 – вертикальний та горизонтальний її перерізи. Гвинтова компресорна установка працює так. Під час роботи установки атмосферне повітря через повітряний фільтр 3 всмоктується в компресор 1, куди одночасно надходить по лінії 15 і охолоджене в охолоджувачі 16 масло, необхідне для охолодження стисненого повітря, ущільнення зазорів між робочими органами компресора та змащення підшипників. Масло, змішуючись із повітрям, утворює масляно-повітряну суміш, що стискається в компресорі 1 до встановленого робочого тиску, потім потрапляє в масловіддільник 5. У двох ступенях масловіддільника 5 повітря очищається від масла і потім через клапан мінімального тиску 6 і вентилі роздачі на роздавальній трубі 7 надходить до споживача.

Датчики системи автоматики і з'єднані з ними пристрої забезпечують спрацьовування систем автоматики при виході установки за межі робочих параметрів. Два температурних датчики 8, 9 системи автоматики, установлені на лінії нагнітання 4 після гвинтового компресора 1 і побудовані за різними фізичними принципами функціонування, забезпечують надійне спрацьовування при переході температури масляно-повітряної суміші за межі встановлених параметрів.

Температурний датчик 10 пневматичної лінії захисту 11 системи автоматики, встановлений у просторі масловіддільника 5, забезпечує більш надійне спрацьовування при переході температури масла пустоти масловіддільника 5 за критичні параметри.

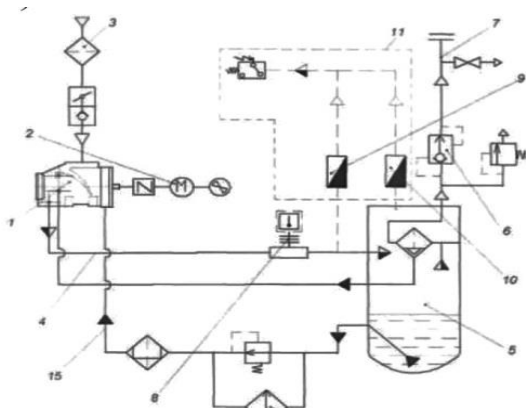


Рисунок 3.117 – Пневмогідралічна схема гвинтової компресорної установки

При перевищенні температури кожуха привода встановлених меж температурний датчик 12, установлений на кожусі привода, забезпечує аварійне відімкнення компресора 1. При виникненні пожежонебезпечної ситуації температурний датчик 13 системи пожежогасіння, установлений над масловіддільником 5, забезпечує спрацьовування пристрою 14 подачі речовини для усунення пожежі, установленого над масловіддільником 5, ефективно локалізує можливу пожежу в місці розміщення основного елемента шахтної компресорної установки, що містить основну (90 %) частину пожежонебезпечної речовини. При виникненні критичної ситуації з підвищенням концентрації метану датчик метану 17 забезпечує спрацьовування системи автоматики, а розміщення цього датчика у верхній частині корпусу компресорної установки забезпечує спрацьовування його в місці початкового накопичення метану у верхній його частині.

Основні етапи розроблення установок компресорних шахтних пересувних УКГШ включали:

1. Одержання висновку експертизи МакНДІ про відповідність устаткування підвищеної небезпеки вимогам нормативно-правових актів з охорони праці і промислової безпеки й можливості його експлуатаційних випробувань у шахтах України. За результатами експертизи установка УКГШ-7,5/7В5 визнана такою, що відповідає вимогам нормативно-правових актів, і є дозвіл на проведення випробувань (експлуатації) у підземних тупикових виробках шахт, зокрема небезпечних щодо газу й пилу, відповідно до «Правил безпеки у вугільних шахтах».

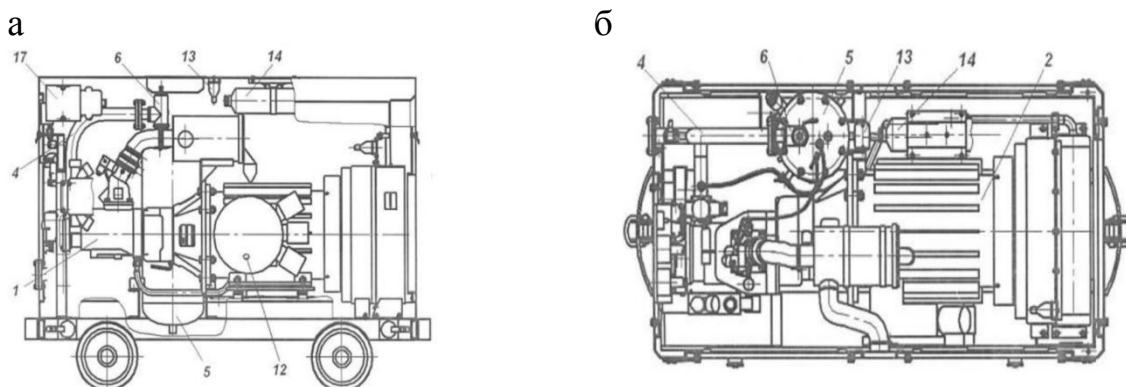


Рисунок 3.118 – Гвинтова компресорна установка: а – горизонтальний переріз; б – вертикальний переріз

2. Розроблення й узгодження Технічних умов.

3. Проведення приймальних випробувань разом із ВАТ «НДІГС ім. М. М. Федорова», НДІГС «Респіратор» дослідного зразка установки на ВП «Шахта Добропільська» ДП «Добропільлявугілля».

4. Одержання висновку експертизи Донецького експертно-технічного центру Держгірпромнагляду України (ДЕТЦ) про відповідність устаткування підвищеної небезпеки вимогам нормативно-правових актів з охорони праці та промислової безпеки.

5. Одержання дозволу Держгірпромнагляду України на початок експлуатації установок у шахтах України на підставі експертизи ДЕТЦ.

6. Експлуатацію настановної серії і широке впровадження на шахтах України компресорних шахтних пересувних УКГШ.

У 2012 році були одержані сертифікати відповідності технічному регламенту про безпеку машин та устаткування на підставі протоколу сертифікаційних досліджень і протоколу періодичних випробувань установок УКГШ-5/7, УКГШ-7,5/8, УКГШ-15/7.

3.9.2. Оцінювання та способи підвищення надійності вузлів і блоків компресорних машин

На підприємствах вугільної промисловості України впроваджені установки компресорні шахтні УКГШ-7,5/7; УКГШ-10/7; УКГШ-15/7 розроблення концерну «НІКМАС» кількістю більше 1 148 установок продуктивністю 7,5–15 м³/хв. Установки експлуатуються з 2001 року.

Шахтні компресорні установки типу УКГШ мають більш високий рівень пожежної безпеки, ніж застосовувані раніше установки ШВ-5. За час експлуатації не було зафіксовано жодного випадку загоряння, що мало місце під час експлуатації попередніх компресорних установок інших типів.



Рисунок 3.119 – Шахтна гвинтова компресорна установка УКГШ-10/7 А У2 з електричною системою захисту

Описано вдосконалені конструкції шахтних гвинтових компресорних установок (рис. 3.119), а також статистичні дані відмов вузлів та блоків компресорних машин під час їх експлуатації в умовах вугільних шахт. На основі системного аналізу виявлено, що основними дестабілізуючими факторами впливу на техніко-економічні показники компресорних машин є зношування навантажених вузлів, що супроводжується збільшенням електроспоживання системи привода або зупиненням. Особливо небажане зношування гвинтових

пар, оскільки збільшення зазору між ними в процесі експлуатації призводить до істотного зниження ККД.

Типорозмірний ряд шахтних гвинтових компресорних установок наведений у табл. 3.18.

Для забезпечення більш ефективного очищення повітря в умовах підвищеної запиленості шахт та рудників установки мають удосконалену систему фільтрації, зокрема додатково укомплектовані повітряним фільтром маслоінерційного типу, що дозволяє експлуатувати установку при запиленості повітря до 100 мг/м³. Компресорні установки типу ВВ-25/8 М1 У2; ВВ-32/8 М1 У2; ВВ-32/8 Т2 використовуються як невід'ємна складова частина бурового устаткування (рис. 3.120, 3.121).

Таблиця 3.18 – Параметри шахтних гвинтових компресорних установок

Параметр і конструктивна особливість	УКГШ-4/7	УКГШ-5/7	УКГШ-6/7	УКГШ-7,5/7	УКГШ-10/7	УКГШ-11/7	УКГШ-15/7	УКГШ-20/7	
Стисливий робочий агент	Повітря								
Об'ємна продуктивність, зведена до початкових умов, м ³ /хв	4,0	5,0	6,15	7,5	10,0 ± 1,0	11,0 ± 0,5	14,5 ± 0,72	20,0 ± 1,0	
Тиск початковий, номінальний, кгс/см ²	1,03								
Тиск кінцевий, номінальний, кгс/см ²	6,0 ± 7,0	6,0 ± 7,0	6,0 ± 7,0	6,0 ± 7,0	6,0 ± 7,0	6,0 ± 8,0	6,0	6,0	
Початкова температура максимальна, °С мінімальна, °С	+35 -5	+35 -5	+35 -5	+35 -5	+40 -5	+40 -5	+35 -5	+35 -5	
Кінцева температура, °С, не більше: без кінцевого охолоджувача із кінцевим охолоджувачем	100 на 20 ⁰ вище від температури всмоктуваного повітря								
Потужність, споживана компресорною установкою, кВт	25	31	37	47	54±57	73	не більше 90	не більше 110	
Питома споживана потужність, кВт м ³ /годину	6,25	6,2	6,17	6,27	5,7 _{-0,3}	6,63	6,2	5,8	
Потужність встановленого електродвигуна, кВт (асинхронний, трифазний, вибухозахищений)	30	37	45	55	55 або 75	75	90	110	
Витрата масла на віднесення, г/м ³ повітря, не більше	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	
Рівень звуку на відстані 1 м, дБ, не більше 7 м, дБ, не більше	89 80	89 80	89 80	89 80	90 80	93 80	93 80	93 80	
Синхронна частота обертання, с ⁻¹ (об/хв)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500)	25 (1 500) або 50 (3 000)	
Напруга живлення, В	380/660	380/660	380/660	380/660 або 660/1 140	380/660	380/660	380/660	380/660 або 660/1 140	
Можливість розміщення пускача в кузові установки	+	+	+	+	+	+	+	+	
Марка пускача	ПВІ125	ПВІ125	ПВІИ125	ПВІ125	ПВІ160	ПВІ160	ПВІ250	ПВІ250	
Система захисту	ПГЗ* або УЗКВ** або мікропроцесорна								
Габаритні розміри, мм									
без убудованого пускача	довжина	2 200	2 200	2 200	2 200	2 800	2 800	3 140	3 200
	ширина	1 050	1 050	1 050	1 050	1 100	1 150	1 140	1 140
	висота	1 500	1 500	1 500	1 500	1 400	1 485	1 600	1 640
із убудованим пускачем	довжина	2 600	2 600	2 600	2 600	3 200	2 800	3 200	3 200
	ширина	1 050	1 050	1 050	1 050	1 100	1 150	1 140	1 140
	висота	1 500	1 500	1 500	1 500	1 400	1 485	1 600	1 640
Маса установки, кг	1 500	1 500	1 500	1 500	3 000	3 000	2 900	3 000	
База транспортного візка, мм/колію, мм	1 250/600 (900)	1 250/600 (900)	1 250/600 (900)	1 250/600 (900)	1 650/600 (900)	1 650/600 (900)	1 650/600 (900)	1 650/600 (900)	

Продовження таблиці 3.18

Параметр і конструктивна особливість	УКГШ-4/7	УКГШ-5/7	УКГШ-6/7	УКГШ-7,5/7	УКГШ-10/7	УКГШ-11/7	УКГШ-15/7	УКГШ-20/7
Стисливий робочий агент	Повітря							
Очищення всмоктуваного повітря (ефективність)								
I варіант – сухий фільтр	+	+	+	+	+	+	+	(від 10 до 30 мг/м ³)
II варіант – комбінований (фільтри сухий + масляно-інерційний)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)	(від 10 до 30 мг/м ³)
	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)	(до 100 мг/м ³)
Пересувна на колесах	+	+	+	+	+	+	+	+
Стационарна	+	+	+	+	+	+	+	+

* ПГЗ – виконання установки із пневмогідравлічною системою захисту.

** УЗКВ – виконання установки з електричною системою захисту

У процесі оптимізації параметрів першої серії машин в установку ВВ-32/8М1У2 було внесено значну кількість конструктивних змін: уведений вертикальний сепаратор-масловіддільник, завдяки цьому віднесення масла не перевищує 3 мг/м³, інтервал між заміною масла – 3 500 годин; уведений термостат для полегшення запускання і прогрівання; застосований електродвигун спеціального виконання для бурових верстатів; компресорний блок та електродвигун з'єднані за допомогою сполучного корпусу та встановлені на амортизаторах – зникла необхідність у періодичному центруванні, зменшене навантаження на підшипники, знизилася вібрація; поліпшена конструкція клапанів мінімального тиску і стравлювального – підвищена їх надійність; модернізовано охолоджувач масла – зменшилися вага і габарити; застосовані більш надійні датчики температури й електромагнітні клапани; модернізовано систему регулювання продуктивності – електродвигун запускається при розвантаженому компресорі, що підвищує надійність роботи електродвигуна і пускової апаратури; проведена модифікація компресорної установки за рахунок застосування контролерного керування.

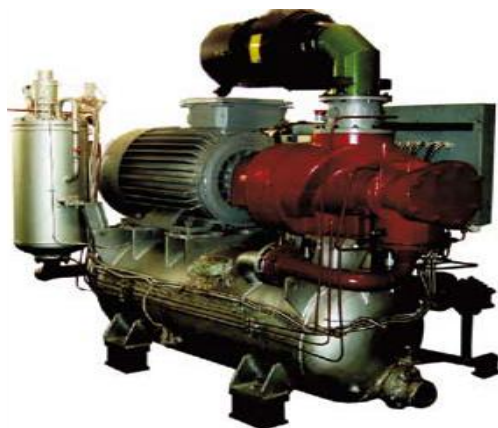


Рисунок 3.120 – Зовнішній вигляд компресорної установки для бурової установки



Рисунок 3.121 – Буровий верстат СБШ-250МНА-32КП із компресорною установкою ВВ-50/8У2

Використання мікропроцесорного блока керування дозволяє повністю контролювати роботу компресорної установки. Контролер оснащений енерго-незалежною пам'яттю значного обсягу, яка запам'ятовує поточні параметри та режими компресора, а також дії оператора за тривалий проміжок часу.

Компресорна установка ВВ-50/8У2 оснащена мікропроцесорною системою керування, високовольтним електродвигуном, компресорним блоком, ефективною системою фільтрації повітря і масла, ефективною системою зниження вібрації, пристроєм передпускового підігрівання, системою розвантаженого запуску й зупинення.

Структурна схема установки, в якій враховані елементи і складові одиниці, що впливають на показники надійності компресорних машин, наведена на рис. 3.122.

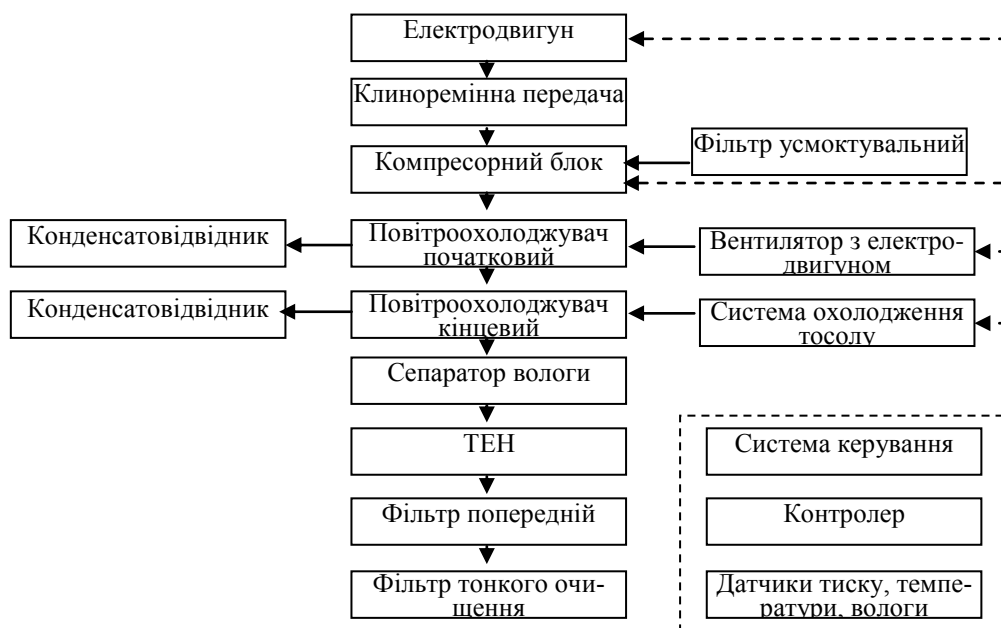


Рисунок 3.122 – Ієрархічна структура системи компресорної машини

Наведено розрахунки показника надійності вузлів та компресорних машин у цілому. У табл. 3.19 подані результати розрахунків показників надійності. Установлений ресурс за елементами від 2 107 до 13 162 годин, що перевищує задане значення в ТЗ. Імовірність безвідмовної роботи елементів при цьому коливається від 0,975 до 0,9995. Імовірність безвідмовної роботи при встановленому ресурсі системи в цілому дорівнює 0,9434. Середнє напрацювання на відмову за елементами коливається від 20 000 до 125 000 годин. Імовірність безвідмовної роботи елементів при цьому коливається від 0,827 до 0,998.

На рисунку 3.123 показано напрями підвищення надійності компресорних машин, реалізованих у цьому дослідженні. Відмови окремих підсистем компресорного господарства шахти є випадковими величинами. Виконано аналіз причин відмови роботи компресорних машин через несправність окремих вузлів (рис. 3.124).

Таблиця 3.19 – Розрахункові значення показників надійності елементів компресорної машини

Найменування	Середнє на- працювання на відмову $T_{сер i}$, годин	Щільність імовірності відмови f_i	Імовірність безвідмовної роботи $P(8000)_i$	Інтенсив- ність відмови λ_i	Установлене безвідмовне на- працювання $T_{y i}$
Контролер	39 736	$1,78 \cdot 10$	0,827	$2,03 \cdot 10$	
Блок подачі повітря	85 969	$9,2 \cdot 10$	0,9975	$9,22 \cdot 10$	9 057
Повітроохолоджувач попередній	50 000	$5,27 \cdot 10$	0,995	$8,99 \cdot 10$	5 288
Конденсатовідвідник	30 000	$2,2 \cdot 10$	0,987	$2,23 \cdot 10$	3 160
Фільтр грубого очищення	100 000	$2,03 \cdot 10$	0,998	$2,03 \cdot 10$	10 536
Фільтр тонкого очищення	100 000	$2,03 \cdot 10$	0,998	$2,03 \cdot 10$	10 536
Електронагрівач	25 000	$4,04 \cdot 10$	0,978	$4,13 \cdot 10$	2 634
Датчик тиску	125 000	$8,7 \cdot 10$	0,9975	$8,71 \cdot 10$	13 162
Датчик температури	20 000	$8,9 \cdot 10$	0,96	$8,94 \cdot 10$	2 107



Рисунок 3.123 – Напрями підвищення надійності компресорних машин

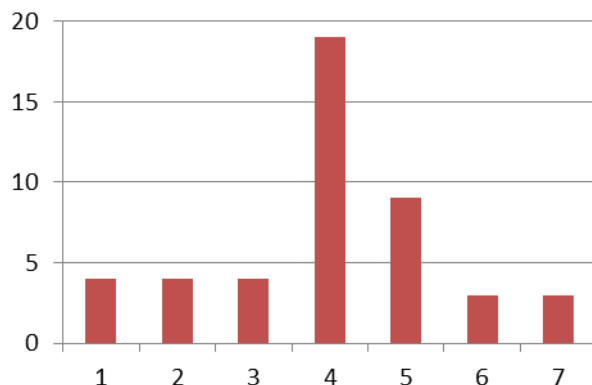


Рисунок 3.124 – Гістограма відносної частоти виходу з ладу вузлів та деталей компресорів у процесі експлуатації у вугільних шахтах: 1 – фільтр масляний; 2 – термометр; 3 – компресорний блок; 4 – контролер; 5 – електродвигун; 6 – клапан усмоктування; 7 – регулятор температури

РОЗДІЛ 4

ВИКОРИСТАННЯ КОМПРЕСОРНОГО ОБЛАДНАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ В СИСТЕМАХ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ПРИ ВИДОБУВАННІ ТА ТРАНСПОРТУВАННІ ВУГЛЕВОДНІВ

4.1. Способи попередження, локалізації, гасіння підземних пожеж у вугільних шахтах за допомогою азотних компресорних станцій АМГП

4.1.1. Розроблення установок для інертизації атмосфери, попередження і гасіння пожеж у гірничих виробках, гвинтових компресорних станцій для одержання газоподібного азоту

Актуальність розроблення установок для інертизації атмосфери, попередження і гасіння пожеж у гірничих виробках, гвинтових компресорних станцій для одержання газоподібного азоту з повітря шляхом мембранного поділу продиктовано перспективами їх використання з урахуванням економічної доцільності, що спирається на закордонний досвід і розрахунки ефективності.

Запропоновано модель виділення метану в тупиковій виробці та визначений час досягнення вибухонебезпечної концентрації. При стаціонарному процесі швидкість надходження газу у виробку збігається зі швидкістю винесення газу з виробки. Однак надходить у виробку чистий метан, а виноситься – метаноповітряна суміш. Тому зміна середньої концентрації c метану у виробці можна обчислити за диференціальним рівнянням

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \varphi(t)(1 - c). \quad (4.1)$$

Перевага запису в безрозмірному вигляді полягає в можливості одержувати концентрацію метану безпосередньо у відсотках. Розв'язок рівняння (4.1) має вигляд

$$c(t) = 1 - e^{-\int_0^t \varphi(t') dt'}.$$

Графік цієї функції поданий на рис. 4.1. Він дозволяє оптимізувати застосування азотних мембранних станцій для попередження вибуху метану.

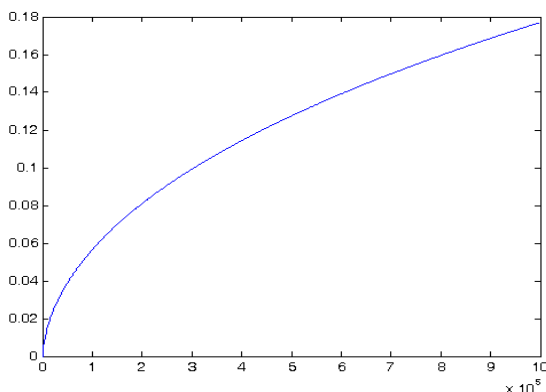


Рисунок 4.1 – Залежність середньої концентрації метану в атмосфері виробки від часу

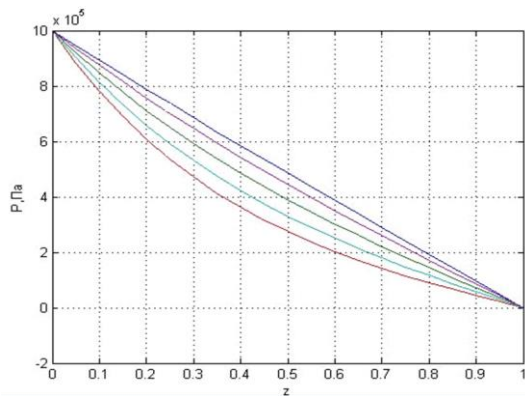
У початковий період концентрація метану зростає лінійно, як $\varphi(0)t$, а з перебігом часу концентрація наближається до одиниці за експонентним законом. Це означає, що з часом виробка заповнюється лише метаном, тобто метан повністю витісняє повітря з виробки. Це витіснення відповідно до приблизного оцінювання відбувається за декілька діб. У дійсності через виснаження джерел, тобто спадання

$\varphi(t)$, повне витіснення повітря відбувається за місяці або навіть роки.

Найбільшу актуальність представляє визначення часу досягнення вибухонебезпечної концентрації. З рисунка 4.1 бачимо, яким чином можна визначити час $t_{кр}$ досягнення вибухонебезпечної концентрації. Для цього необхідно будувати серії числових розв'язків рівняння (4.1), змінюючи такі параметри, як коефіцієнт фільтрації, швидкість просування вибою, швидкість руху конвеєрної стрічки, розмір фракції вугілля, що добувається. Для визначення брали нормативне значення вибухонебезпечної концентрації $c_{кр} = 0,03$. Для розгазування ділянок можуть бути використані азотні станції, розміщені безпосередньо у вибої або на поверхні.

Моделювання процесів поділу повітря в порожнистоволоконних модулях (рис. 4.2) дозволило оптимізувати конструкцію газороздільних модулів азотних мембранних компресорних станцій.

а)



б)

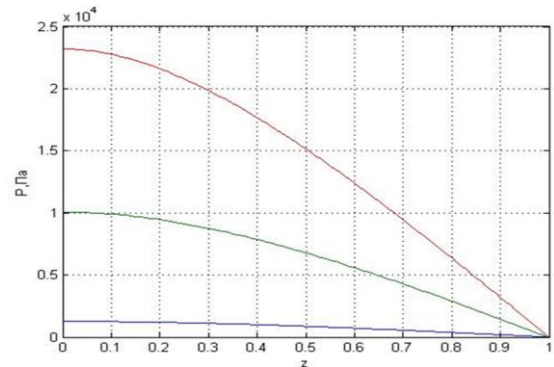


Рисунок 4.2 – Розподіл тиску по довжині порожнистоволоконних мембран (а) і розподіл тиску по довжині волокна в міжволоконному просторі (б)

На рисунку 4.3 показані типові експериментальні результати залежностей продуктивності газороздільних мембранних блоків від концентрації і температури. Запропоновано також використовувати додатково зріджувач газоподібного азоту. Розрахункові значення коефіцієнтів добування газоподібного азоту подані в табл. 4.1. Величиною V_A позначена концентрація азоту в потоці азоту на виході з мембранного модуля, β_A – коефіцієнт добування газоподібного азоту, $(\beta_A)_{max}$ – максимальне значення коефіцієнта добування.

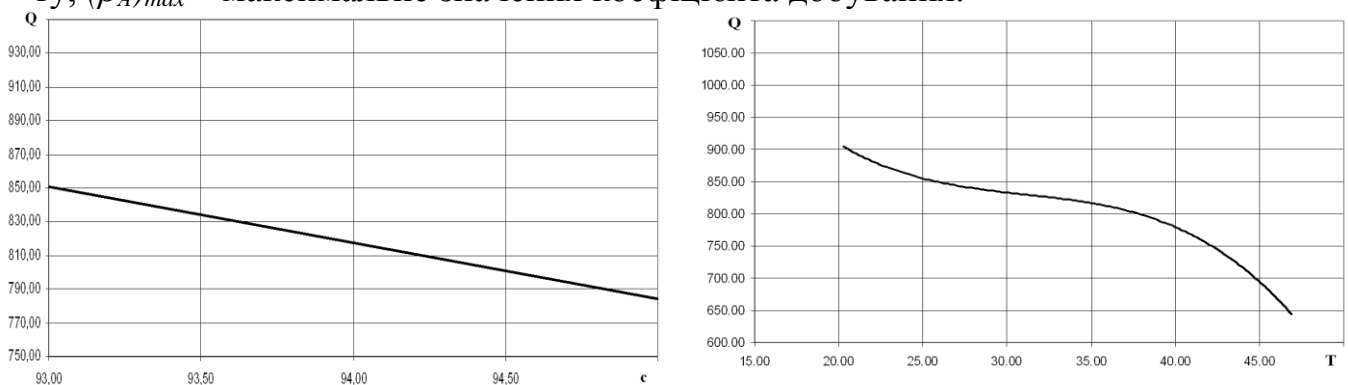


Рисунок 4.3 – Типові експериментальні результати залежностей продуктивності газороздільних мембранних блоків від концентрації і температури

Наявність зріджувача дозволить напрацювати деякий запас рідкого азоту завчасно, а також у процесі проходження станції до місця призначення у випадку використання дизельного привода компресора.

Таблиця 4.1 – Характеристики ступеня добування газоподібного азоту

Марка установки	Y_A	β_A	$\beta_A/(\beta_A)_{max}$
АМГП-0,25/1,2	0,99	0,125	0,16
АМВ-2,5/0,7	0,95	0,328	0,43
АМВ-5,5/0,7	0,95	0,36	0,48
АМГП-15/0,7	0,95	0,344	0,46
НД-20/33	0,95	0,483	0,64
СД-10/250	0,95	0,483	0,64

Із 2003 року станції АМГП-15/0,7 С У1 (рис. 4.4) були задіяні під час ліквідації аварій на вугільних шахтах України. Характеристики системи віддаленого моніторингу включають: одночасну роботу в реальному часі декількох користувачів із декількома пристроями; практичне накопичення необмеженого обсягу інформації; гнучку систему комунікацій і моніторингу; безпечну передачу даних (можливість шифрування); використання стандартних інфраструктур (GSM/GPRS, Internet, OPC); використання відкритих протоколів передачі даних (ModBus, TCP/IP, SMTP, FTP і т. п.); можливість роботи із пристроями сторонніх виробників.

При цьому рівень пристроїв дозволяє здійснювати моніторинг і керування пристроєм або групою пристроїв. Він представлений контролером COMCONT-M (табл. 4.2). Має енергонезалежну пам'ять, у якій накопичується інформація про аварії, події і дані. Зв'язок із контролером здійснюється через інтерфейс стандарту RS232/RS485, протокол ModBusRTU.

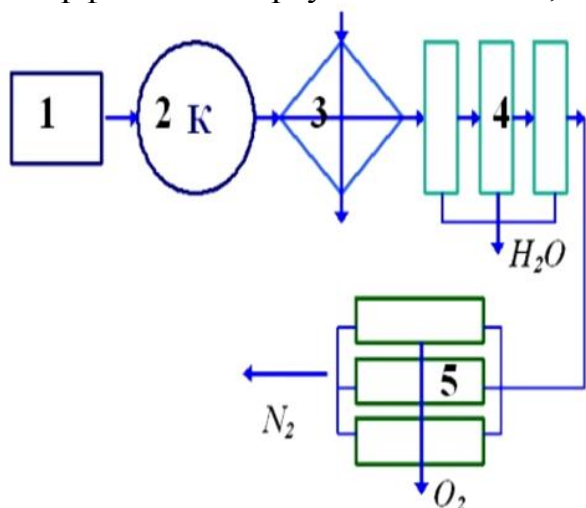


Рисунок 4.4 – Принципова схема азотної станції типу АМГП-15/0,7 СУ1:
 1 – первинні датчики (тиску, температури, струму, рівня масла); 2 – виконавчі механізми (електромагнітні клапани, електродвигуни, електронагрівачі;
 3 – силова пускозахисна апаратура (автоматичні вимикачі, пускачі, електротеплові реле, запобіжники, трансформатори); 4 – вимірювальна і керувальна апаратура (вимірювальні перетворювачі, регулятори, реле, контролери), органи керування та індикації (перемикачі, кнопки, сигнальна арматура)

Розглянуто особливості вимог до системи охолодження, підготовки повітря, привода, шумопоглинання, автоматики шахтних компресорних машин і систем віддаленого моніторингу (рис. 4.5). Розроблені й удосконалені технології виготовлення азотних мембранних станцій, а також методи їх випробування з урахуванням специфіки експлуатації в гірничорудній галузі дозволили розробити наукові основи створення систем інертизації гірничих виробок при оптимальному оснащенні їх підземними азотними станціями або станціями наземного базування. Обґрунтовано оптимальні параметри азотних мембранних станцій і комплексу системи автоматики для забезпечення безпечної роботи в гірничих виробках. Розроблено конструкції і технології створення машин для одержання рідкого азоту з газоподібного.

Таблиця 4.2 – Характеристики розроблених контролерів

Характеристика	«Комконт»	«Комконт-М»
Аналогові входи, од.	13	30
Дискретні входи, од.	16	32
Дискретні виходи, од.	10	16
Аналогові виходи, од.	0	4
Канал зв'язку в стандарті RS232/ RS485, од.	2	2
Пам'ять програм, кБт	32	128
Пам'ять даних, Бт	256	8448
Тактова частота, МГц	22	До 100
Протоколювання роботи	Немає	Є
Розроблення ПО	Асемблер	САПР
Габаритні розміри, мм	220 × 300 × 100	240 × 260 × 30

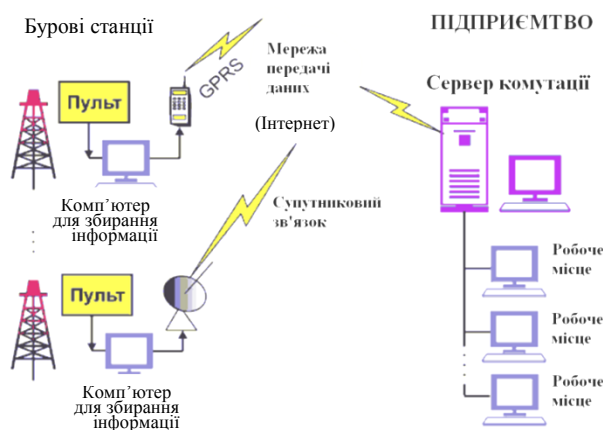


Рисунок 4.5 – Схема системи віддаленого моніторингу АМГП і УКГ

Основними етапами розроблення станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП були:

- 1) розроблення і затвердження в Міністерстві палива та енергетики України технічного завдання на станцію АМГП;
- 2) розроблення програми і методики попередніх випробувань;
- 3) проведення приймальних випробувань дослідного зразка станції установки на шахті «Бутовська» ДП «Макіїввугілля»;

4) розроблення та узгодження з Держгірпромнаглядом України технічних умов;

5) експлуатація та широке впровадження на шахтах України станцій АМГП.

У 2013 році надано сертифікат відповідності технічному регламенту про безпеку машин і устаткування на підставі протоколу сертифікаційних досліджень і протоколу періодичних випробувань станцій азотних АМН, АМВН, АМГП, АМЦН, ААН, ААВН, ААЦН, СДА, НДА.

4.1.2. Спосіб ліквідації початкової стадії підземних пожеж

Розроблено спосіб ліквідації початкової стадії підземних пожеж у діючій або в зупиненій виробці у разі, коли зводять герметичну перемичку з одночасним поданням інертного газу у вугільну виробку. Він відрізняється тим, що у вугільній виробці додатково розміщують устаткування для контролю за індикаторними газами, об'ємним вмістом кисню, азоту, метану і за станом окремих фізичних параметрів атмосфери виробки, таких як тиск, температура, задимленість повітряного середовища виробки, швидкість повітряного потоку у виробці, за устаткуванням для перетворення і передавання даних від різноманітних датчиків як частини автоматизованої системи виявлення і ліквідації початкової стадії підземних пожеж, а виробку закривають принаймні двома або більшою кількістю перемичок із проміжками між ними, які утворюють газові камери.

На рисунку 4.6 схематично зображено технологічний ланцюжок для реалізації запропонованого способу. Технологічний ланцюжок устаткування працює так. У вугільній шахті існує певна кількість виробок. За даними геологорозвідувальних організацій, після детальної розвідки шахтного поля кернові проби вугілля інституту безпеки визнають такими, що схильні до самозаймання усіх нашарувань вугілля в шахті. Після детального аналізу встановлюють перелік найбільш схильних до самозаймання нашарувань вугілля в шахті й обладнують елементами, що входять до технологічного ланцюжка з попередження самозаймання вугілля. При цьому базові елементи, що входять до технологічного ланцюжка як реєстраційні, встановлюють у контрольних точках, які перебувають на шляху руху повітряного середовища через нагромадження вугілля у виробничому середовищі і яких повинно бути не менше чотирьох (вхідна, очисний вибій, вироблений простір, вихідний з очисного вибою).

Для виявлення початкової стадії виникнення підземних пожеж у рудниках служить базовий модуль, який встановлюють безпосередньо в передбачених зонах утворення пожежних ситуацій. Кількість базових блоків БМП 8, їх комплектність визначають структурою і розгалуженістю об'єкта контролю. Дія базового модуля ґрунтується на вимірюванні показників ряду основних газових складових компонентів за допомогою стаціонарного модуля контролю з картриджами для індикаторних газів 1, а також на вимірюванні фізичних показників, таких як температура – датчиком температури 2, швидкість повітряного середовища – датчиком швидкості повітряного середовища 3, задимленість – датчиком диму 4, тиск – блоком датчиків 19. Усі ці датчики підключають до дже-

рела постійного струму 5. Сигнали з блоків модульних надходять у блок перетворення і передачі даних 7, де сигнали перетворюють на один тип необхідного діапазону частот. Далі сигнал через комутатор 9 надходить у блок інтелектуальний 10. За допомогою блока інтелектуального визначають реальні причини зростання показників датчиків контролю і за наявності відповідних програм розпізнають: фонові рівні газів у рудниковій атмосфері (з урахуванням технологічних і транспортних систем рудника), пожежу – за динамікою співвідношень індикаторних газів, початок пожежі – за зміною фізичних показників (швидкості потоку, температурою повітряного середовища, концентрацією димних аерозолів) та місце виникнення пожежі, а також розраховують аварійні і загрозові зони; взаємодіють із системою зв'язку центральної служби керування безпекою 20, з підсистемою керування вентиляцією рудника 28.

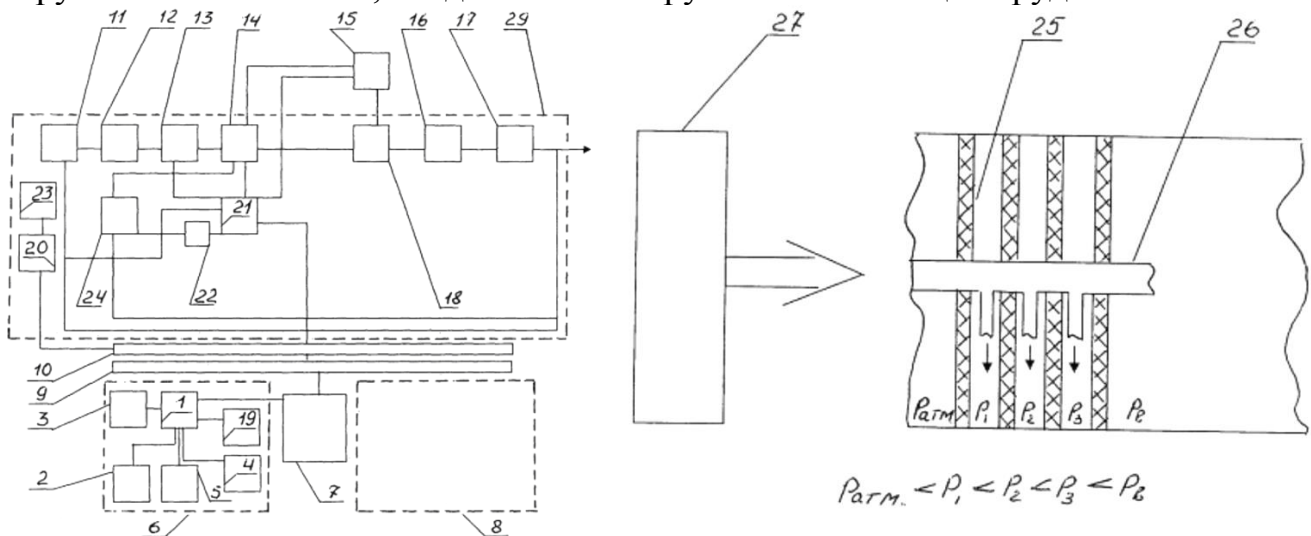


Рисунок 4.6 – Технологічний ланцюжок реалізації способу

У момент, коли блок інтелектуальний 10 після чергового оброблення даних виявляє початок процесу самонагрівання, він подає сигнал через систему сповіщення 23 і сповіщає про початок процесу самонагрівання. Також блок інтелектуальний 10 подає відповідний сигнал підсистемі керування вентиляцією 28 на закриття повітряних заслінок (не показаний) і сигнал у центральну систему керування безпекою 20. Після чого відповідна служба ставить перемички 25 із пристроєм шлюзового типу для введення інертного газу 26 для герметизації зони горіння і підключає його через розподільний трубопровід 27 до автоматичної установки газового пожежогасіння 29. Включають станцію азотну 11 через блок керування 21, під'єднуючи її до блока інтелектуального 10, що виробляє азот концентрацією 92–99,5 %, їй необхідний певний час для початку роботи. Інерційність цього устаткування буде залежати від швидкості зведення перемичок для утворення шлюзу, що герметизує захищену виробку. Не потрібно забувати, що невиправдана затримка терміну дії устаткування призводить до невиправдано великого матеріального збитку. При зведенні шлюзової камери, яка утворює перемички, через блок керування 21 подають сигнал у систему пуску керованим клапаном 14, що подає сигнал керованому клапану на відкриття балонів високого тиску 24, обладнаних системою контролю тиску 22, і на відк-

риття накопичувального резервуара зі зрідженим азотом 13, що являє собою посудина Дьюара. Далі зріджений азот надходить до імпульсного газифікатора-перетворювача тиску 18, що містить також випарник азоту. Швидкість утворення газоподібного азоту буде залежати від кількості теплоти, що підводиться до імпульсного газифікатора-перетворювача 18 з випарником азоту, посудина якого виконана у вигляді ємності для випарювання зрідженого азоту під високим тиском, частково заповненої профільованою теплоаккумуляторною насадкою. Імпульсним газифікатором-перетворювачем 18 керує блок програмного керування клапанами 15 і з'єднаний з блоком керування 21. Далі, минаючи трубопровід запобігання стрибка тиску в посудині випарника 16 і дросельовальний пристрій 17, азот надходить на розподільний трубопровід 27, пристрій шлюзового типу 26 і в захищену виробку. Блок датчиків метану (CH_4), кисню (O_2), азоту (N_2) і тиску 19 є складовою частиною блока модульного 6, і від нього сигнал надходить у блок інтелектуальний 10, що, у свою чергу, керує подачею азоту та її припиненням у захищену виробку після відповідного оброблення даних з усіх датчиків. Станція азотна 11 після ліквідації загрози переходу до стадії самозаймання, а також для поповнення зрідженого азоту в накопичувальному резервуарі 13 внаслідок випарювання, виробляє азот, що скраплюється в зріджувачі азоту 12. Система контролю тиску балонів високого тиску з азотом 22 діє таким чином, що при зниженні тиску автоматично подається сигнал на блок керування 11, який фіксує цей сигнал і завдяки якому ліквідує недолік персонал, який обслуговує устаткування технологічного ланцюжка.

4.1.3. Застосування пересувних азотних компресорних станцій із мембранним роздільним блоком

Розробленню та створенню нових ефективних технологій і методів попередження, локалізації та ліквідації наслідків пожеж у багатьох галузях промисловості, забезпеченню безпеки ведення гірничих робіт передувала низка надзвичайних ситуацій, що мали місце у вугільній промисловості України, країн близького і далекого зарубіжжя.

Для успішної боротьби з вогняною стихією сучасна протипожежна служба повинна мати у своєму розпорядженні різноманітну техніку. Пожежні автомобілі, автонасоси і т. п. – це оснащення, розраховане на застосування води для гасіння пожежі і безпосередньо пов'язане з наявністю її джерела. Багатотонні автоцистерни, використовувані у випадках, коли доступ до джерела води утруднений або навіть неможливий, також не вирішують проблеми безперервної подачі води через її вичерпний запас. У зв'язку із цим розроблення нових методів гасіння пожеж є одним із найважливіших завдань.

На сьогодні відомі та застосовуються різні способи запобігання і гасіння пожеж. Найбільш ефективний із них полягає у створенні інертного газового середовища в ізольованому просторі вогнища пожежі. Необхідну для цього техніку будують за сучасними технологіями.

Вивчивши світову практику одержання інертних газових середовищ, технічні рішення, застосовувані провідними виробниками аналогічного устатку-

вання, АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» у 2003 р. розробило проект, виготовило і випробувало дослідний зразок азотної мембранної гвинтової пересувної станції АМГП-15/0,7С У1 (рис. 4.7, табл. 4.3). Для забезпечення вищезазначених параметрів у складі станції як газороздільне устаткування застосовані повітрянороздільні мембрани виробництва світового лідера в даній галузі – фірми Parker (США). З урахуванням вимог до мобільності в станції застосована повітряна система охолодження стисненого повітря.

Мембранні картриджі змонтовані в мембранному модулі, з'єднані між собою складною системою технологічного устаткування. Керування процесом поділу стисненого повітря на азот і супутні компоненти здійснюється за допомогою мікропроцесорної системи керування, створеної на сучасній елементній базі.

Для забезпечення безвідмовної роботи мембранного модуля впродовж усього терміну служби станції особливу увагу приділили якості повітря, що подається на поділ у мембранний модуль.

Таблиця 4.3 – Технічна характеристика станції АМГП-15/0,7 С У1

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність станції за азотом, м ³ /хв	15
Тиск нагнітання азоту (надлишковий), МПа	0,7
Концентрація азоту на виході зі станції, %	до 97
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	12 000×2500×4000
Маса, кг	32 000



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд станції АМГП-15/0,7 С У1

Робочі параметри повітря на вході в мембранний модуль повинні відповідати таким вимогам, як: відсутність краплинної вологи; вміст масла – не більше ніж 0,01 мг/м³; вміст механічних домішок – не більше ніж 0,01 мг/м³; температура – не більше ніж 50 °С.

Необхідність забезпечення цих вимог обумовила розроблення і використання в складі станції гвинтового компресорного агрегата сухого стиснення. Застосування таких компресорів дозволяє позбутися проблеми очищення стисненого повітря від масла, що значно зменшує вартість додаткових систем осушування, витрати на обслуговування й експлуатацію у зв'язку з невеликим обсягом усіх видів технічного обслуговування та збільшених міжремонтних термінів. Результати аналізу вмісту масла в стисненому повітрі, що подається компресорами різних типів, наведені в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Вміст масла в стисненому повітрі, що подається компресорами різних типів

Тип компресора	Вміст масла в стисненому повітрі, мг/м
Гвинтові сухого стиснення	
Відцентрові	0,001–0,01
Гвинтові маслозаповнені	2–15
Поршневі, що змащуються	2–10
Безмасляні поршневі	0,001–0,01

Як бачимо, найменший вміст масла в стисненому повітрі у гвинтових компресорах сухого стиснення, безмасляних поршневих і відцентрових. Порівнюючи гвинтові компресори сухого стиснення з поршневими, можна засвідчити, що основні труднощі при створенні та експлуатації безмасляних поршневих компресорів стиснення обумовлені необхідністю підбирання пар тертя циліндр – поршневі кільця, що працюють в умовах високих температур і більших швидкостей. Це значно знижує їх надійність і ресурс роботи. Крім того, поршневі компресори мають потребу в щоденному технічному обслуговуванні, більш трудомісткому, ніж обслуговування гвинтових. Гвинтові компресори сухого стиснення у двоступінчастому виконанні мають більші перспективи для застосування в промисловості при тиску робочого середовища до 1,15 МПа, що обумовлено їх надійністю і більшим ресурсом роботи, який досягає 100 000 годин і більше.

Крім того, якщо буде потреба очищення повітря від масла і його осушування при застосуванні маслозаповнених компресорів, вартість додаткового устаткування може перевищити вартість компресора. При цьому значно зростають і витрати на технічне обслуговування, заміну фільтрів і т. п., а якість наданого споживачеві повітря за вмістом масла поліпшується незначно й залишається недостатньою для сучасних промислових технологій. Найсучасніші методи очищення, що використовують комбіновані системи, які містять мікрофільтри, осушувачі й адсорбери, наприклад адсорбційні осушувачі, дозволяють знизити вміст масла лише до 0,003 мг/м³.

При застосуванні маслозаповнених компресорів необхідно також урахувати таку важливу проблему, як утилізація конденсату стисненого повітря. Це дорогий процес, тому що конденсат на 97 % складається з води. Навіть застосування сепараторів із відділення масла від води гарантує залишковий вміст масла у воді близько 20 мг/м³. Застосування гвинтових компресорів сухого стиснення дозволяє простіше і якісніше вирішувати питання утилізації, що важливо при вирішенні проблем охорони довкілля.

У станції АМГП-15/07 С У1 застосований гвинтовий компресорний агрегат сухого стиснення, розроблений на базі гвинтового блока CD-26D виробництва фірми GHH-RAND (рис. 4.8). Принципова схема станції наведена на рис. 4.9.



Рисунок 4.8 – Мембранний модуль станції АМГП-15/0,7 С У1

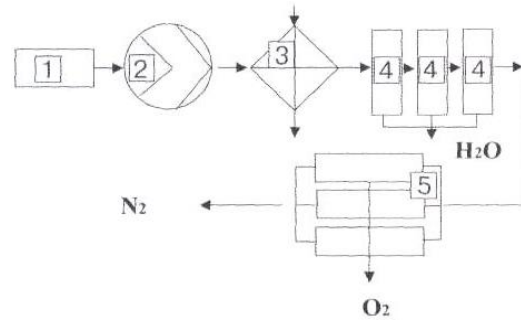


Рисунок 4.9 – Принципова схема станції АМГП-15/0,7 С У1: 1 – фільтр (0,01 мкм); 2 – компресор сухого стиснення; 3 – кінцевий повітроохолоджувач із підтримкою заданої температури; 4 – блок підготовки повітря; 5 – мембранний блок

Атмосферне повітря через фільтр надходить на всмоктування двоступінчастого компресорного агрегата сухого стиску. Стиснене до 1,1 МПа повітря охолоджується в кінцевому повітроохолоджувачі до необхідної температури, після чого надходить у блок підготовки повітря. У блоці підготовки повітря очищається від механічних включень, а також осушується до температури точки роси 3 °С. Потім підготовлене повітря подається в мембранний блок, де відбувається його поділ на азот та інші компоненти.

Принцип дії мембранних газороздільних установок ґрунтується на різній швидкості проникнення газів через полімерну мембрану під дією перепаду парціальних тисків на мембрані. Кожний компонент повітряної суміші, що надходить у надмембранний простір на поділ, має свою швидкість проникання, яка залежить від його здатності розчинятися в мембрані і проникати через неї.

Конструктивно станція складається з трьох модулів (рис. 4.10): компресорного агрегата, підготовки повітря і системи КІП і А, мембранного модуля. Виготовлена фахівцями АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» станція АМГП-15/0,7 С У1 успішно пройшла заводські випробування на підприємстві-виготовлювачі та приймальні випробування в замовника (державне підприємство «Макіїввугілля», Донецька обл., Україна). Наприкінці 2003 р. станцію АМГП-15/0,7 С У1 застосовували під час гасіння пожежі на шахті ім. О. Ф. Засядька та одній із шахт ДП «Ровенькиантрацит» (рис. 4.11). Оперативно доставлена на місце аварії станція успішно зарекомендувала себе в реальних умовах пожежогасіння, подавши в гірничу виробку (зону горіння) 62 000 м³ азоту. За допомогою станції АМГП-15/0,7 С У1 пожежу було ліквідовано упродовж 72 годин.



Рисунок 4.10 – Конструктивне виконання станції АМГП-15/0,7 С У1



Рисунок 4.11 – Робота дивізіону азотних пересувних станцій під час гасіння пожежі на шахті ім. О. Ф. Засядька

4.2. Гасіння пожеж на складах зберігання паливно-мастильних матеріалів із застосуванням високоефективних піноутворювальних пристроїв

Найбільшими пожежами на складах зберігання паливно-мастильних матеріалів залишаються пожежі, що відбуваються в резервуарах, які входять також до технологічних схем підприємств, пов'язаних із видобуванням, транспортуванням, переробленням та зберіганням вуглеводневих продуктів. Приблизно 35 % зареєстрованих пожеж відбувається при підготовці і проведенні ремонтних робіт. У процесі ремонту з'являються додаткові технологічні джерела запалювання, пов'язані з проведенням різальних, зварювальних, вогневих, вибухових та інших робіт, пов'язаних із застосуванням відкритого полум'я; наявність крапель розплавленого металу або потужних безполумєневих джерел тепла, що виникають під час роботи механічних інструментів.

Таким чином, аналіз пожеж на підприємствах нафтогазової промисловості показує, що всі вони мають істотну особливість: причина цих пожеж – як правило, ціла сукупність обставин, кожна з яких сама по собі не могла ініціювати велику пожежу, і лише їх поєднання призводить до серйозних наслідків.

Для протипожежного захисту об'єктів нафтогазової промисловості, а також у тих умовах, де у виробничому циклі застосовуються легкозаймисті та горючі рідини, використовують пінні вогнегасні установки. Піна – це колоїдна система, що складається з пухирців газу, оточених плівкою поверхнево-активних речовин і стабілізаторів. Піна використовується для гасіння насамперед легкозаймистих і горючих речовин, що не вступають у взаємодію з водою. Хімічна піна утворюється при взаємодії лужного й кислотного розчинів за наявності піноутворювача, при цьому утворюється газ – двооксид вуглецю, виникає стійка піна, що тривалий час залишається на поверхні горючої речовини.

Вогнегасна властивість піни обумовлена насамперед її ізоляційною дією, а відтак здатністю перешкоджати надходженню в зону полум'я горючих парів і кисню, що підтримують процес горіння. Ізолювальна дія піни пов'язана з її фізико-хімічними властивостями й структурою, а ефект дії залежить від товщини шару піни, а також від природи горючої речовини. Під час гасіння піною твер-

дих горючих матеріалів певне значення має охолоджувальна дія піни. Вогнегасні властивості піни визначаються ще такими її характеристиками: кратністю – відношенням об'єму піни до об'єму рідкої фази, з якої вона утворилася; стійкістю – опором процесу руйнування, що оцінюється часом виділення з піни 50 % рідкого компонента; в'язкістю – здатністю утримуватися на вертикальних і похилих поверхнях. Із підвищенням в'язкості стійкість піни зростає, але погіршується її розтікання на поверхні, що горить. Чим вища кратність піни, тим менша витрата води, але при цьому погіршуються вогнегасні властивості за рахунок зменшення стійкості піни та її ізолювальної здатності.

Хімічну піну одержують із водних розчинів кислот і лугів, повітряно-механічну – утворюють із водних розчинів і піноутворювачів потоками робочого газу: повітря, азоту і вуглекислого газу. Хімічна піна складається з 80 % вуглекислого газу, 19,7 % води і 0,3 % піноутворювальної речовини, повітряно-механічна – приблизно з 90 % повітря, 9,8 % води і 0,2 % піноутворювача. Як системи протипожежного захисту об'єктів хімічної та нафтової промисловості облаштовують пінні спринклерні та дренчерні установки. Спринклерні установки включаються автоматично при відкриванні замка, конструкція якого дещо відрізняється від водяного. Автоматичне джерело спринклерної піни має високий напір води, що забезпечує безперебійну роботу після відкриття пінного спринклера. Ці установки аналогічно з водяними мають контрольні-сигнальні вузли та автоматичні дозатори для введення у потік води відповідної кількості піноутворювача. Дренчерні пінні установки здійснюють захист таких об'єктів, де пожежі швидко поширюються на значну площу і необхідно зрошувати розрахункові площі, частини будівель або весь об'єкт повітряно-механічною піною. Дренчерні пінні установки об'ємного пожежогасіння обладнують генераторами для утворення повітряно-механічної піни високої кратності. Під час виникнення пожежі спрацьовує пожежний сповіщувач, який запускає контрольний вузол для пуску водного розчину піноутворювача у генератори піни. Дозатор забезпечує автоматичне регулювання подачі піноутворювача залежно від режиму витрати води в установці.

Якщо горючі матеріали розміщені нерівномірно, облаштовують швидкодіючі автоматичні установки локальної дії, які обмежують і гасять пожежі лише в межах протипожежного відсіку. Для вибору раціональних режимів роботи генераторів для утворення піни високої кратності, які використовуються в установках об'ємного пожежогасіння, доцільно було б використовувати рекомендації п. 3.4.2.1. Для визначення оптимальної конструкції піногенераторного устаткування рекомендуються застосовувати методи, наведені в п. 3.4.2.1.2.

РОЗДІЛ 5

ДОСВІД ЗАСТОСУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ КОМПРЕСОРНИХ МАШИН У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ПРОМИСЛОВОСТІ

5.1. Технології термостатування аерокосмічних апаратів

Термостатування – це контрольоване подавання або відбирання енергії нагрівання, або охолодження для підтримки постійної температури середовища. Для цих процесів застосовуються автоматичні системи термостатування робочих середовищ, які широко використовуються в аерокосмічній галузі промисловості.

Головний аеродинамічний обтічник (ГАО) ракети-носія (РН) призначений для захисту космічного апарата (КА) від зовнішніх впливів, враховуючи вплив теплових і аеродинамічних навантажень під час транспортування повністю зібраної РН, на старті і на атмосферній ділянці польоту РН. Для термостатування підобтічного простору використовуються три системи термостатування, що працюють за принципом активного вентилявання. Система транспортного термостатування призначена для підтримки температурно-вологісного режиму в подобітчному просторі під час транспортування РН на стартову позицію до початку роботи системи термостатування низького тиску, а також під час транспортування РН зі стартової позиції у випадку скасування пуску.

Система термостатування низького тиску призначена для подачі термостатуючого повітря під ГАО в період від відключення системи транспортного термостатування до початку відведення транспортно-встановлювального агрегата. Система термостатування подобітчного простору повітрям високого тиску призначена для подачі термостатуючого повітря під обтічник у період від відключення системи термостатування низького тиску до старту РН, а також у випадку скасування пуску до початку роботи системи термостатування низького тиску.

Для запобігання виходу температури корисного вантажу за допустимі межі при відмові системи термостатування низького тиску передбачене використання системи термостатування високого тиску як резервної. Для продування подобітчного простору використовують повітря і технологічний газ, що відповідають класу чистоти М5.5 (10000) за FED-STD-209E. Системи термостатування забезпечують у порожнині ГАО температуру повітря в діапазоні 13–25 °С, а швидкість газу на поверхні корисного вантажу (КВ) не більше ніж 2 м/с.

ТОВ «МІКЕМ» має практичний досвід розроблення робочого проекту і виготовлення «Мобільного кондиціонера транспортної системи термостатування» (МК). МК призначений для подачі термостатуючого повітря із заданими параметрами в головний обтічник ракети-носія «Зеніт-2SLБ» та «Зеніт-3SLБ» у РН, а також під час їх транспортування на об'єкті підготовки і запуску РН.

МК забезпечує на виході із системи такі параметри робочого середовища:

- витрату повітря – 2 000 м³/годину (~2 450 кг/год.) + 10 %;
- тиск на вході в об'єкт – не менше ніж 10 кПа;

- діапазон температур повітря на вході в об'єкт – від 10 до 35 °С;
- точність підтримки заданої температури – ± 2 °С;
- точку роси повітря на вході в об'єкт – не вище ніж 2 °С;
- чистоту повітря на вході в об'єкт ISO 6.7/14644/1 (клас 5 000 стандарту США FED STD 209E).

Устаткування МК змонтоване в дизельному вагоні рефрижераторної секції (рис. 5.1) і на платформі прикриття (рис. 5.2) й з'єднується між собою трубопроводами та електричними кабелями.

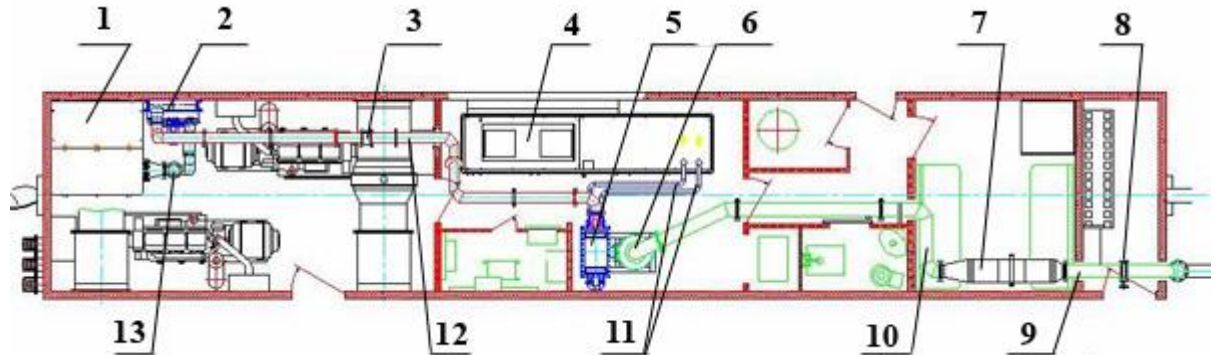


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд МК:

- 1 – роторний компресор; 2 – блок проміжного охолодження повітря; 3 – витратомір; 4 – водоохолоджувач; 5 – повітроохолоджувач кінцевий; 6 – сепаратор вологи; 7 – електронагрівачі; 8 – затвор дисковий; 9 – трубопровід між електронагрівниками і гнучким трубопроводом; 10 – трубопровід між сепаратором вологи і електронагрівниками; 11 – трубопроводи подачі охолодної рідини на кінцевий повітроохолоджувач; 12 – трубопровід з витратоміром між повітроохолоджувачем кінцевим і блоком проміжного охолодження повітря; 13 – трубопровід із клапаном запобіжним між компресором і блоком проміжного охолодження повітря

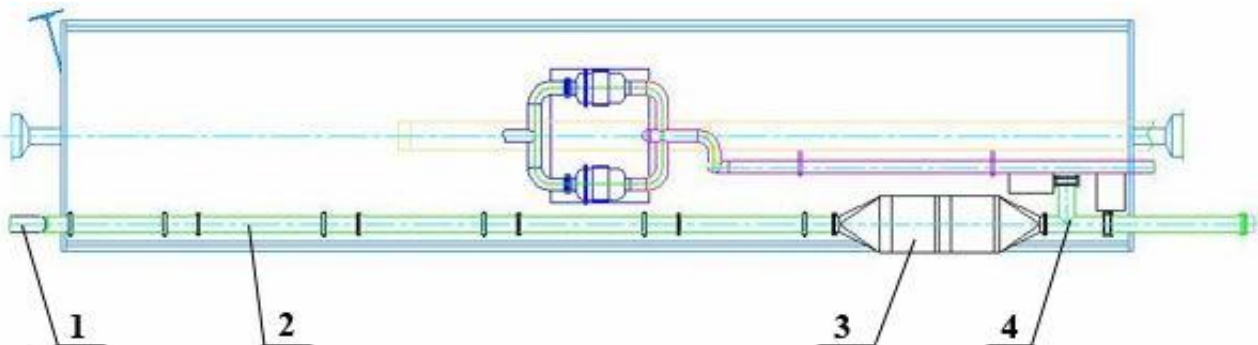


Рисунок 5.2 – Платформа прикриття МК:

- 1 – гнучкий трубопровід; 2 – трубопровід подачі повітря на очищення; 3 – система очищення (фільтри попереднього і тонкого очищення); 4 – трійник із затворами дисковими з електроприводами і штуцером відбору проб

За способом циркуляції термостатуючого повітря – МК відкритого типу (із забиранням із довкілля і скиданням повітря після ГО РКН у довкілля). МК живиться від дизелів-генераторів вагона або від щитка розподільного технологічного устаткування (ЩР ТУ) системи 19 В, частотою 50 Гц, електропостачання із трифазною напругою 380 В.

- МК призначений для роботи в будь-яку пору року і доби за таких умов:
- температури навколишнього повітря – від -29 до $+45$ °С, температури навколишнього повітря у вагоні – від $+5$ до $+40$ °С;
 - відносної вологості повітря – до 98 % за температури $+20$ °С;
 - атмосферного тиску – 750 мм рт. ст.;
 - споживаної електричної потужності – 100 кВт (макс.);
 - рівня шуму під час роботи – не більше ніж 80 дБ.

Аерокосмічна галузь є одним із важливих індикаторів рівня промислових технологій як в Україні, так і в інших країнах. Це величезний комплекс, що передбачає проектування й промислове виробництво як космічних апаратів (КА), так і наземної інфраструктури, зокрема й стартових комплексів, необхідних для забезпечення підготовчих робіт, транспортування і запуску КА. Концерн «НІКМАС» розробляє і виготовляє системи термостатування (СТ), ґрунтуючись на п'ятдесятирічному досвіді в галузі виробництва компресорної техніки, систем підготовки повітря, газороздільних мембранних систем.

Застосування СТ в аерокосмічній галузі обумовлене унікальністю створюваної та експлуатованої техніки. У процесі життєвого циклу КА значна кількість вузлів, агрегатів, технологічних матеріалів (палива) вимагає застосування СТ. Повітряні СТ призначені для підтримки температурно-вологісного режиму вузлів і агрегатів об'єкта термостатування (ОТ): ракет-носіїв, зокрема головного відсіку, у салонах і відсіках цивільної та військової авіації і т. п. Зокрема, підтримка температурно-вологісного режиму необхідна на етапі підготовки КА (рис. 5.3), транспортування до стартової площадки, передпускових операцій. Здійснюється термостатування безперервною подачею стислого до певного тиску газу, переважно повітря, з необхідною температурою і вологовмістом. У цілому СТ практично аналогічна цивільним системам вентиляції і кондиціонування, лише з жорстко заданими діапазонами за витратою термостатуючого повітря його температурі й вологовмісту. При цьому на відміну від цивільних систем вентиляції і кондиціонування, що працюють безупинно, повітряна СТ має обмежену кількість циклів використання (до 15 у рік) із загальним річним напрацюванням не більше ніж 200–300 мотогодин/рік.

а)



б)



Рисунок 5.3 – Термостатування головної частини КА повітряної СТ:
а) в ангарі; б) під час транспортування на стартовий майданчик

Основними параметрами контрольованого середовища в СТ є тиск, температура і вологість. Таким чином, визначальними елементами в структурі СТ є блок компримування повітря і блок підготовки повітря. При цьому основними елементами блока підготовки повітря, як правило, є система фільтрації, система осушування, система охолодження і підігрівання, система відведення конденсату та ін. Крім того, до складу СТ входять допоміжні системи, призначені для забезпечення життєдіяльності СТ у цілому, наприклад, блок акумуляторів для передпускової підготовки, дизель-генератор, система освітлення, система вентиляції та кондиціонування та ін. Керування і контроль роботи СТ здійснюється

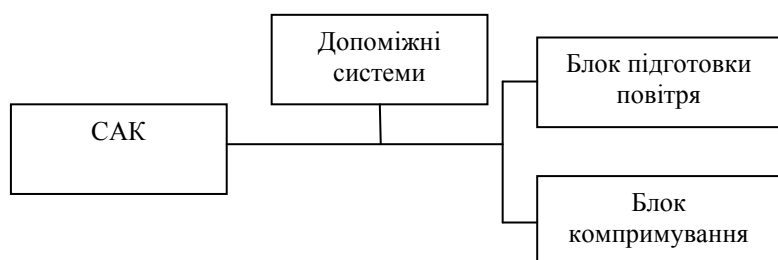


Рисунок 5.4 – Блок-схема основних вузлів повітряної СТ

системою автоматичного керування (САК). Збільшена блок-схема повітряної СТ наведена на рис. 5.4.

Під час розроблення СТ вихідними даними в технічному завданні (ТЗ) для проектування є: витрата газу на вході у ОТ, тиск газу на вході у ОТ, температура газу на вході у ОТ, вологість газу

на вході у ОТ, склад домішок у газі, кліматичні умови в районі стартового комплексу, тип (пересувна, стаціонарна), вимоги щодо автономності, планована кількість циклів використання; час безперервної роботи при кожному циклі використання, призначений термін служби до списання.

Аналіз ТЗ дозволяє визначити склад устаткування, необхідного для реалізації проекту з розроблення, виготовлення й експлуатації СТ. Витрата і тиск газу визначаються розмірами та призначенням ОТ. При досить широкому можливому діапазоні витрати газу надлишковий тиск на вході у ОТ для повітряних СТ, як правило, не перевищує 0,01 МПа. Найбільш доцільним уявляється застосування компресорів типу газодувок (повітродувок), що працюють у зазначеному діапазоні тиску. Залежно від необхідної продуктивності можливе застосування компресорів відцентрового типу, роторних (типу Рутса), вихрових та ін. Для створення більш високого тиску застосовують поршневі, гвинтові, спіральні та інші типи компресорів.

Задані параметри вологістості термостатуючого повітря визначають тип застосовуваної системи осушування. За методами системи осушування їх можна розділити на два типи: осушування охолодженням (конденсаційні) і поглинанням (сорбційні).

За температури точки роси під тиском близької до 0 °С і вище переважно застосування систем осушування на базі холодильних машин (ХМ) парокомпресійного або абсорбційного типу. Термостатуюче повітря при цьому охолоджується до температури точки роси з подальшим відведенням конденсату, що утворився, і нагріванням до робочої температури. Найбільш поширені парокомпресійні ХМ із холодоагентами на базі фреонів (гідрофторвуглеводнів) або натуральних холодоагентів (аміак, вуглекислота та ін.). Використання зазначе-

них озонобезпечних холодоагентів обумовлене приписами Кіотського протоколу 1997 р., що обмежує застосування озоноруйнівних речовин.

Для стаціонарних СТ одним із раціональних рішень є застосування ХМ абсорбційного типу, які більш економічні в експлуатації, мають низький рівень шуму, високу довговічність та екологічність, але водночас вимагають наявності джерела тепла, наприклад міні-котельні або ТЕЦ.

Для більш глибокого осушування призначені осушувачі адсорбційного або мембранного типу, гемосорбційні та ін. Найбільш широкого використання набули осушувачі адсорбційного типу, що працюють на принципі сорбування (поглинання) водяних парів із термостатуючого повітря з подальшою регенерацією сорбенту. Адсорбційні осушувачі ефективні в діапазоні температур точки роси від мінус 10 °С до мінус 70 °С, не вимагають глибокого охолодження термостатуючого повітря. Однак для відновлення (регенерації) робочих властивостей адсорбенту потрібна збільшена витрата термостатуючого повітря і додаткові енерговитрати.

Останнім часом усе найбільш поширені осушувачі мембранного типу, принцип роботи яких ґрунтується на різній швидкості проникнення водяних парів і сухого повітря через полімерну мембрану під дією парціального тиску. При безсумнівних перевагах (простота конструкції, відсутність електропідключення, відсутність необхідності в технічному обслуговуванні, екологічна безпека) мембранні осушувачі вимагають додаткової витрати повітря на відведення водяних парів (пермеат), ретельного очищення від краплинної вологи і парів масла на вході в мембрану. До того ж мембранні осушувачі розраховані на досить незначну витрату повітря (до 10 м³/хв при тиску 0,7 МПа). За значних витрат термостатуючого повітря з температурою точки роси нижче мінус 20 °С оптимально використовувати турбохолодильні установки.

У процесі технологічної підготовки термостатуюче повітря проходить ряд циклів нагрівання – охолодження. Із цього ряду можна виділити основні етапи нагрівання при адіабатичному стисканні в компресорній установці: охолодження після стискання в компресорній установці (зокрема пряме охолодження до температури точки роси під тиском), нагрівання до температури входу в ОТ.

Безпосереднє охолодження термостатуючого повітря виконується системою охолодження. Теплообмінне устаткування може бути з повітряним або водяним (рідинним) способом охолодження, а за конструктивним виконанням пластинчасто- і трубчасто-ребристим, пластинчастим, кожухотрубним. Нагрівання термостатуючого повітря може здійснюватися як за допомогою теплообмінного устаткування, так і прямим нагріванням за допомогою підігрівників, наприклад електричних.

Система фільтрації призначена для запобігання влучення в ОТ дрібнодисперсних забруднень та емульсії. Як правило, достатнє використання стандартних промислових фільтроелементів на паперовій основі. За необхідності більш ретельної фільтрації застосовуються фільтроелементи на іншій основі, наприклад, вугільні, коалесцентні.

Система відведення конденсату необхідна для поділу і відведення з термостатуючого повітря краплинної вологи при його охолодженні. Відділення

краплинної вологи здійснюється у фільтрах-сепараторах типу «циклон». Власне, відведення вологи за межі повітряної магістралі виконують конденсатовідвідники. Найбільш простий і поширений тип конденсатовідвідників – поплавковий, що спрацьовує в міру заповнення конденсатом поплавкової камери. Також застосовуються конденсатовідвідники з керуванням за сигналом, наприклад, таймерні.

Підтримка необхідних параметрів термостатуючого повітря на вході у ОТ повинна забезпечувати САК, що має у своєму складі первинні вимірювальні датчики і контролер. Під час проектування повітряної СТ насамперед необхідно розглянути загальні витрати з погляду життєвого циклу СТ. Загалом ці витрати можна розділити на 3 частини: основні, або капітальні (витрати на проектування і виготовлення), експлуатаційні витрати і витрати на утилізацію. Тут є принципова різниця СТ із цивільними системами вентиляції і кондиціонування, у яких експлуатаційні витрати при практично безперервній роботі завжди більші від основних, тоді як у СТ експлуатаційні витрати завжди будуть нижчими від основних. Таким чином, до складу СТ повинен входити мінімальний набір необхідних вузлів і агрегатів, що забезпечують необхідні параметри термостатуючого повітря. Внесення до конструкції СТ додаткових елементів, що знижують експлуатаційні витрати, доцільно лише за їх окупності до кінця терміну служби СТ. Зазначений підхід дозволяє прийняти збалансоване рішення щодо конструкції СТ.

Для одержання заданого тиску термостатуючого повітря був застосований компресор роторний (типу Рутса), серійного випуску АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» (рис. 5.5). Цей компресор зарекомендував себе надійною і довговічною роботою і має одні з найбільш енергоефективних показників у зазначеному діапазоні продуктивності.

Первинне регулювання продуктивності (у межах припустимого динамічного діапазону) виконується інвертором (частотним перетворювачем). Остаточне регулювання виконується скиданням надлишкового повітря «на свічу» електроприводним клапаном. Застосування інвертора дозволяє також знизити пускові навантаження на джерело живлення, що особливо важливо для мобільних СТ.

Осушення термостатуючого повітря виконується безпосереднім охолодженням до температури точки роси з подальшим відділенням і відведенням конденсату, що утворився. Здійснюється охолодження за двоконтурною схемою. Термостатуюче повітря охолоджується в теплообміннику проміжним теплоносієм (розчин пропіленгліколівої суміші), що, у свою чергу, охолоджується в ХМ. Для цього використана промислова водоохолоджувальна установка (чиллер) із повітряним охолодженням конденсатора (рис. 5.6).

Для зниження необхідної холодопродуктивності водоохолоджувачів установки термостатуюче повітря попередньо охолоджується атмосферним повітрям у проміжному теплообміннику типу «повітря – повітря» із недоохолодженням 3–5 °С. Для проміжного і кінцевого теплообмінників застосовані теплообмінники пластинчасто-ребристого типу, серійного випуску АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» (рис. 5.7).



Рисунок 5.5 – Компресор роторний



Рисунок 5.6 – Водохолоджувальна установка

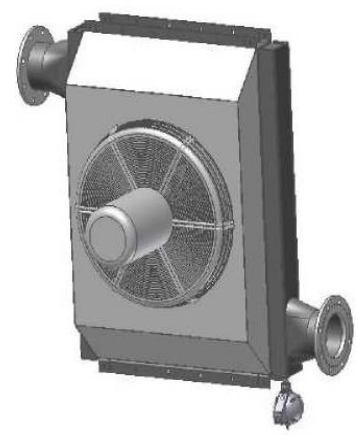


Рисунок 5.7 – Проміжний охолоджувач

Після відділення конденсату у фільтрі-сепараторі циклонного типу він відводиться за допомогою поплавкового конденсатовідвідника. Для запобігання обмерзання передбачений вузол підігрівання конденсатовідвідника. Відведення конденсату передбачене як після проміжного, так і після кінцевого охолоджувачів. Для підвищення температури термостатуюче повітря пропускається через електричний нагрівач типу ТЕН, потужність якого регулюється залежно від заданої температури. Після охолодження додаткової тонкої фільтрації термостатуюче повітря подається в ОТ. Електропостачання СТ забезпечує дизель-генераторна установка, потужність якої розрахована з урахуванням усіх виконавчих агрегатів і механізмів СТ.

Керування СТ виконується САК верхнього рівня, основними функціями якої є контроль стану, забезпечення захисту і блокування, керування, накопичення та облік інформації, надання наочної інформації про хід технологічного процесу, забезпечення оперативної й аварійної сигналізації та ін. На підставі одержаних сигналів від первинних датчиків температури, тиску, датчика роси і витратоміра видаються керувальні сигнали на виконавчі механізми для регулювання параметрів термостатуючого повітря (рис. 5.8). Для захисту СТ від впливу довкілля все устаткування знаходиться в контейнері, що, у свою чергу, розміщується на транспортній платформі, зокрема на залізничній (рис. 5.9, 5.10).

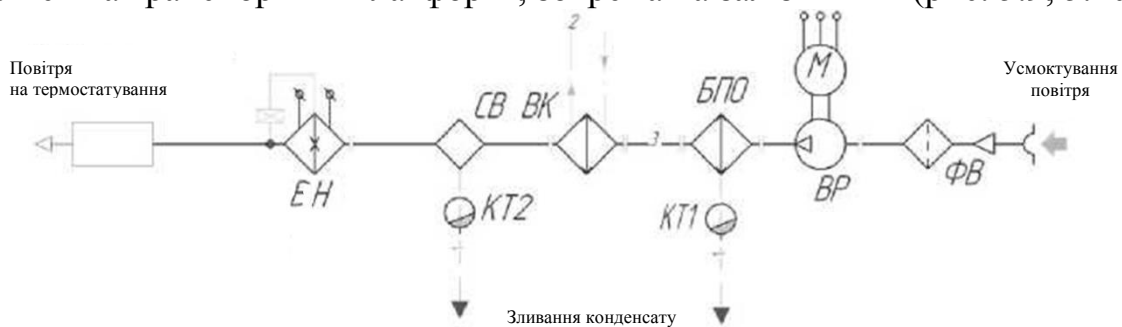


Рисунок 5.8 – Спрощена схема повітряної СТ: ФВ – фільтр повітряний; КР – компресор роторний; М – привід компресора; БПО – проміжний охолоджувач повітря; ВК – кінцевий охолоджувач повітря; СВ – фільтр-сепаратор; КТ – конденсатовідвідники; ЕН – підігрівач



Рисунок 5.9 – Повітряна СТ на етапі заводських випробувань



Рисунок 5.10 – Повітряна СТ у процесі експлуатації

Таким чином, на базі технічних рішень концерну «НІКМАС» створена повітряна система термостатування для експлуатації в одній із найбільш високотехнологічних галузей промисловості. Позитивний досвід застосування підтверджує надійність повітряної СТ.

5.2. Утилізація і когенерація звалищного газу установками УКГ

Концерн «НІКМАС» має досвід у проектуванні і виготовленні компресорних установок для утилізації шахтного метану, придатних для застосування на полігонах твердих побутових відходів і когенераційних технологій. Підвищенню ефективності утилізації метану буде сприяти освоєння виготовлення мембранних установок для його збагачення.

Установки УКГ можуть бути застосовані на підприємствах харчопереробної, сільськогосподарської, хімічної, вугільної, нафтової промисловостей, житлово-комунального господарства. Шахтний, звалищний, природний та інші гази з високим вмістом N_2 , CO , C_2 та інших домішок мають теплотворну здатність до $4\ 000$ ккал/м³, що утруднює їх використання як палива для двигунів. Теплотворна здатність газу за ДСТ 5542-87, використовуюваного як паливо, повинна бути не меншою ніж $7\ 600$ ккал/ м³.

Будь-який полігон твердих побутових відходів – великий біохімічний реактор, у надрах якого у процесі експлуатації, а також упродовж декількох десятиліть після закриття в результаті розкладання відходів рослинного і тваринного походження утворюється звалищний газ, що є сумішшю метану і вуглекислого газу. Неминуче потрапляння звалищного газу в атмосферу супроводжується викидами забруднювальних органічних речовин. Наявність неметанових органічних сполук є причиною неприємного запаху, що поширюється на околицях полігона. Деякі з органічних речовин мають виражену токсичну дію. Одним із варіантів вирішення цієї проблеми є застосування утилізаційних установок у системах для збирання звалищного газу (рис. 5.11).

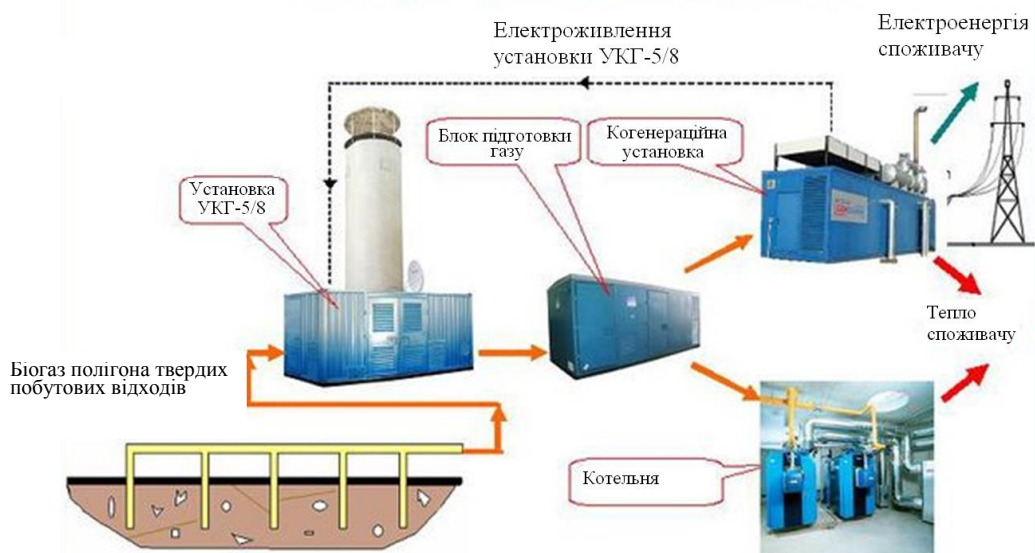


Рисунок 5.11 – Схема енергетичного використання установки УКГ-5/8

5.3. Гвинтові компресорні установки для бурових станків типу СБШ у рудовидобувній промисловості

Інтенсифікація видобутку корисних копалин, боротьба за підвищення ефективності і зниження питомих витрат під час розроблення руди приводять до того, що зростають і вимоги до бурової техніки. Технічний стан бурових верстатів, їх продуктивність (швидкість буріння, діаметр свердловин) і надійність багато в чому визначають ефективність усього процесу видобутку корисних копалин. Компресорна установка – один з основних елементів бурового станка, і від її надійної та ефективної роботи залежить продуктивність станка.

Концерн «НІКМАС» розробив та освоїв виробництво ряду компресорних установок для бурових станків, застосовуваних у гірничодобувній галузі гірничорудної промисловості. З 2001 р. і до сьогодні на об'єкти експлуатації було доставлено більше 210 компресорних установок на ГЗК України, Білорусі, Казахстану, Узбекистану, Туркменістану, Монголії та ін. Зазначеними компресорними установками продуктивністю 25 і 32 м³/хв оснащені бурові станки виробництва ВАТ «Криворіжгормаш», ТОВ «Завод бурової техніки ДСД» (м. Кривий Ріг) та ряду зарубіжних заводів.

При розширенні обсягів виробництва постійно проводилася робота щодо удосконалення компресорних установок для бурових верстатів: підвищення їх надійності, поліпшення експлуатаційних показників і властивостей, зниження собівартості у виробництві, підбір більш надійних комплектувальних виробів. За 8 років до конструкцію компресорних установок ВВ-25/8 М1У2 (Т2), ВВ-32/8 М1У2 (Т2) була внесена значна кількість змін, а саме: уведено вертикальний сепаратор-масловіддільник. Завдяки цьому винесення масла не перевищує 3 мг/м³ на номінальному режимі, інтервал між заміною масла – до 3 500 годин, при цьому зменшена кількість масла в компресорній установці – зменшені експлуатаційні витрати. Уведено термостат – для полегшення запуску і прогрівання; застосований електродвигун спеціального виконання для бурово-

вих станків; компресорний блок і електродвигун з'єднані за допомогою сполучного корпусу і встановлені на амортизаторах – відпала необхідність у періодичному centruванні, зменшилася вібрація. Поліпшено конструкцію клапанів мінімального тиску і стравлювального, підвищена їх надійність. Застосовано більш надійні датчики температури, електромагнітні клапани та пневмоциліндр у системі регулювання продуктивності; модернізований охолоджувач масла та зменшилася його вага і габарити. На випущених на сьогодні компресорних установках застосовується контролерне керування. Використання мікропроцесорного блока керування «Комконт-М» дозволяє повністю контролювати роботу компресорної установки.

Компресорні установки ВВ-50/8 У2 (Т2) продуктивністю 50 м³/хв і тиском абсолютного нагнітання до 8 кг/см², для буріння свердловин 300 і 311 мм у складі бурових верстатів СБШ-250МНА-32КП виробництва ВАТ «Рудгормаш» і СБШ-270ІЗ виробництва Санкт-Петербурзького ТОВ «ОМЗ ГОіТ» оснащені мікропроцесорною системою керування на базі контролера «Комконт-М», висковольтним електродвигуном із датчиками температурного захисту статора і підшипників, компресорним блоком виробництва GHH-RAND, вертикальним масловіддільником, економічним пластинчасто-ребристим маслоохолоджувачем, ефективною системою фільтрації повітря і масла, ефективною системою зниження вібрації, пристроєм передпускового підігрівання та пуску за низької температури доквілля, системою розвантаженого запуску й зупинення. Система КПП і А установки ВВ-50/8 У2 забезпечує захист: електродвигуна від перевантаження і перегрівання; при обриві, перекосі фаз і зниженій напрузі; при низькому рівні масла в масловіддільнику; при підвищеному перепаді тиску на фільтрі-сепараторі; при низькому тиску масла; при підвищеній температурі нагнітання.

Установки компресорні серії ВВ повітряні із гвинтовим компресором і приводом від електродвигуна продуктивністю від 23 до 100 м³/хв, кінцевим абсолютним тиском 8–10 кгс/см² призначені для постачання стисненим повітрям різних систем пневматичних машин, інструментів та устаткування (рис. 5.12–5.14).



Рисунок 5.12 – Установка ВВ-40/8 В3



Рисунок 5.13 – Установка ВВ-50/8 У В3



Рисунок 5.14 – ВВ-100/8 В3

Склад компресорної установки: блок компресорний, блок охолодження масла і газу, масляна системи компресора, система підігріву і перемішування масла, масловіддільник, система нагнітання маслоповітряної суміші, фільтр

очищення повітря, система регулювання продуктивності, електроустаткування, КПП і А (шафа керування), рама, контейнер, комплект ЗІП; установка комплектується системою підігріву масла на вимогу споживача.

5.4. Пересувні гвинтові компресорні станції серії ВВП для будівельно-монтажних робіт

Гвинтові компресорні станції призначені для вироблення стисненого повітря та постачання ним пневматичних інструментів і механізмів, а також для технологічних потреб під час проведення будівельно-монтажних і дорожніх робіт. Продуктивність гвинтових компресорних станцій серії ВВП від 2 до 20 м³/хв (рис. 5.15–5.16, табл. 5.1).



Рисунок 5.15 – Установка ВВП



Рисунок 5.16 – Травмобезпечні пластикові крила

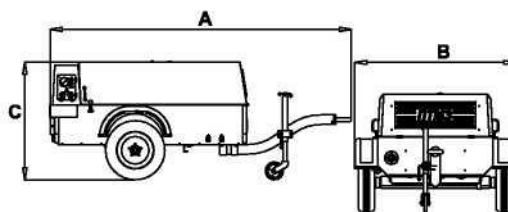
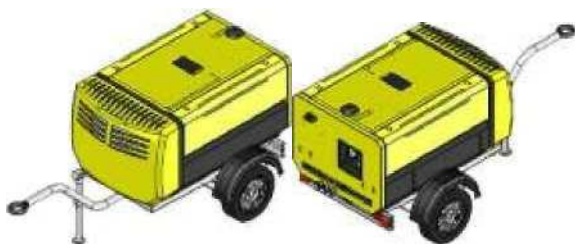


Рисунок 5.17 – Габаритні розміри установки ВВП

Таблиця 5.1 – Технічні параметри установки ВВП

Назва параметра	Од. вим.	ВВП-3/7	ВВП-4/7	ВВП-4,5/7	ВВП-5/7	ВВП-6/7	ВВП-8/7	ВВП-10/7	ВВП-10/10	ВВП-12/7	ВВП-15/10	ВВП-20/7
Компресор												
Робочий тиск (надлишковий)	кгс/с · м ²	7							10	7	10	7
Продуктивність	м ³ / хв	3	4	4,5	5	6	8	10	12	15	20	
Масляна система компресора	л	18				25	36			90		
Витрата масла на віднесення з повітрям	г/год	0,7	0,84	0,95	1,05	1,26	1,68	2,1	2,5	3,15	4,2	
Кількість постів	шт.	2	3	3	3	4	5					
3/4		2	3	3	3	3	3					

Продовження таблиці 5.1

Дизельний двигун												
Марка		Perkins	D201 1L03 Deutz	Д-144	D2011 L03 Deutz	Д-243	Д-245				Д-260	
Число циліндрів	шт.	3	3	4	3	4				6		
Потужність експлуатаційна	кВт	29	36,5	44	36,5	57	76	76	86,2	86,2	184	184
Витрата палива	кг/год	4,1	5,9	6,3	8,1	10,5	13,5	16,5	17,5	17,5	29	29
Охолодження	тип	водяне	повітряне		масляне	водяне						
Ємність паливного бака	л	50	50	50	50	75	100	120	130	130	250	250
А – довжина	мм	3 020	3 020	3 370	3 040	3 500	4 000	4 000	4 000	3 590	5 230	5 230
В – ширина на шасі	мм	1 300	1 550	1 710	1 550	1 750	1 740	1 740	1 740	1 740	1 950	1 950
С – висота на шасі	мм	1 295	1 425	1 350	1 440	1 650	1 940	1 940	1 940	1 950	2 080	2 080
Вага (сухої із шасі), не більше ніж	кг	890	900	1 160	900	1 400	1 600	1 600	1 600	1 600	3 450	3 450

Стандартний комплект поставки: розбірний, пофарбований атмосферостійкою порошковою емаллю кузов із гарантованим захистом від корозії; окремий дишель і торсійна підвіска для забезпечення перевезення в обмеженому просторі кузова транспортного засобу; вантажопідйомний строповний пристрій з однією точкою кріплення; комплект ЗІП; комплект повітря роздавальних вентилів; глушник шуму вихлопу дизельного двигуна; аварійний ланцюг і противідкатні башмаки; регульована по висоті передня стійка з напрямним колесом; електростартерна система запуску двигуна з АКБ; електрична система керування з аварійною сигналізацією контрольованих параметрів; електрофакельний підігрівник дизельного двигуна.

Переваги: застосування шумопоглинальних матеріалів забезпечує зниження рівня шуму станцій; простота в експлуатації забезпечується роботою в автоматичному режимі; зручна система індикації повідомляє оператору всі необхідні дані для обслуговування і роботи; простота в обслуговуванні дозволяє в мінімальний термін робити технічне обслуговування і не вимагає високої кваліфікації оператора; застосування гвинтового компресора підвищує надійність і знижує експлуатаційні витрати; сучасний дизайн станції виконаний відповідно до ергономічних вимог, що дозволяє поліпшити умови роботи; компресорні станції виконані у вигляді транспортних засобів, одноосьових причепів; можливість одержання повітря високої чистоти, завдяки застосуванню сучасних систем повітроочищення; можливість одержання повітря необхідної температури шляхом використання спеціальних теплообмінних пристроїв.

Додаткова комплектація: пневмоінструмент (відбійний молоток, бетонолом, пневмошліфовка, дискова обрізна машина); розширений комплект інструменту для проведення технічного обслуговування; додатковий ящик для інструменту; кузов у шумозаглушеному варіанті; з'єднувальний пневматичний шланг у касетах зі швидкорознімними з'єднаннями; автоматична система аварійного захисту; система підготовки стисненого повітря для проведення піскоструминних і фарбувальних робіт; система автоматичного регулювання продуктивності; система фільтрації усмоктуваного компресором повітря для високих рівнів запиленості; світильники, софіти для проведення робіт у нічний час; запасне колесо і домкрат; пристосування для накачування шин; електричний показчик рівня палива; лічильник мотогодин; світлова сигналізація (габаритні ліхтарі, показчики поворотів, ліхтар висвітлення номерного знака; протитуманний ліхтар); гальмова система (система робочого гальмування, система аварійного гальмування, система стоянкового гальма); комбінований пневмогідравлічний гальмовий привід, виконаний за однопровідною або двопровідною схемою.

Основні вузли: одноосьовий автомобільний причіп на пневматичних колесах з установленими на ньому агрегатами та механізмами; гвинтовий блок або гвинтовий модуль із приводним дизельним або електродвигуном і сполучна муфта; масловіддільник із фільтром тонкого очищення маслоповітряної суміші; шумопоглинальний кузов; система автоматики; блок охолодження масла; паливна система; пульт керування станцією; світлова сигналізація.

5.5. Досвід застосування азотних машин у різних галузях промисловості

Галузі застосування азотних машин:

- вугільна промисловість: при дегазації виробок і гасінні загорянь;
- нафтогазова галузь: забезпечення вибухопожежобезпечності під час видобування, перевезенні, зберіганні, переробленні нафто- і газопродуктів, хімічних речовин; освоєння та інтенсифікація свердловин під час видобування; ремонт свердловин; продувка нафто- і газопроводів, технологічного устаткування для проведення ремонтно-відбудовних робіт;
- машинобудування: створення захисного середовища при лазерному, плазмовому різанні кольорових і високолегованих металів; для вибухопожежобезпечності й азотування деталей у термічних виробництвах;
- хімічна і фармацевтична промисловість: застосування інертного середовища в сучасних хіміко-технологічних процесах; забезпечення безпеки на виробництві під час роботи з горючими, вибухонебезпечними, отруйними речовинами і середовищами; захист технологічних процесів, сировини і продукту від взаємодії з киснем повітря і можливого вилучення аеробних мікроорганізмів;
- харчопром і агропром: тривале і безвідходне зберігання сировини, продуктів перероблення та харчових продуктів в інертній регульованій екологічно чистій атмосфері без консервантів; захист технологічних процесів, устаткуван-

ня та продуктів від окиснення киснем повітря і від шкідливих аеробних організмів;

– енергокомплекс: продувка охолоджувальних оболонок турбогенераторів ТЕЦ, ГРЕС, АЕС та електролізерів від водню й повітря, консервація устаткування; у парогазових установках ПГУ – продувка від вибухонебезпечної (горючої) газової суміші газових турбін, дотискних компресорних станцій, трубопроводів і допоміжного устаткування, підключеного в даних технологічних схемах;

– електроніка: для захисту технологічних процесів, сировини й одержуваної продукції від окиснення; для вибухопожежобезпечності;

– пожежна безпека житлових, промислових споруд, офісів, банків і т. п.

5.5.1. Принципова схема одержання газоподібного азоту методом мембранного та адсорбційного поділу повітря

Схема організації системи виробництва стисненого повітря, його підготовки і підключення до газороздільного блока мембранного типу для одержання газоподібного азоту з атмосферного повітря безпосередньо на місці застосування наведена на рис. 5.18. Схема одержання газоподібного азоту при підключенні газороздільного блока адсорбційного типу наведена на рис. 5.19.



Рисунок 5.18 – Схема організації системи виробництва стисненого повітря



Рисунок 5.19 – Схема одержання газоподібного азоту

5.5.2. Використовувані технології для одержання газоподібного азоту

Для одержання газоподібного азоту концентрацією від 90 до 99,5 % використовуються газороздільні мембрани (рис. 5.20). Для одержання газоподібного азоту концентрацією від 95 до 99,9999 % використовуються газороздільні блоки адсорбційного типу (рис. 5.21).



Рисунок 5.20 – Газороздільні мембрани



Рисунок 5.21 – Газороздільні блоки

5.5.3. Функціональний принцип одержання азоту мембранним та адсорбційним способами

Стисла й осушена вихідна газова суміш подається в мембранні картриджи, змонтовані в модулі. Проходячи усередині порожнистоволоконні мембрани, легкопроникні компоненти газу через пористу зовнішню оболонку просочуються у міжмембранний простір і відводяться на скидання в атмосферу – пермеат. Важкопроникні компоненти газу проходять по всій довжині мембрани і далі надходять споживачеві – азот (рис. 5.22). Стисле і підготовлене повітря подається в адсорбційний роздільник, основною частиною якого є парні алюмінієві адсорбери. Надходячи в один із них, газова суміш проходить через адсорбент – вуглецеві молекулярні сита (CMS), де менші за розміром молекули кисню, а також деяка частина інших наявних у повітрі газів преференційно затримується порами CMS, водночас азот переважно проходить через адсорбер. Другий адсорбер із CMS у цей час перебуває на регенерації (рис. 5.23).

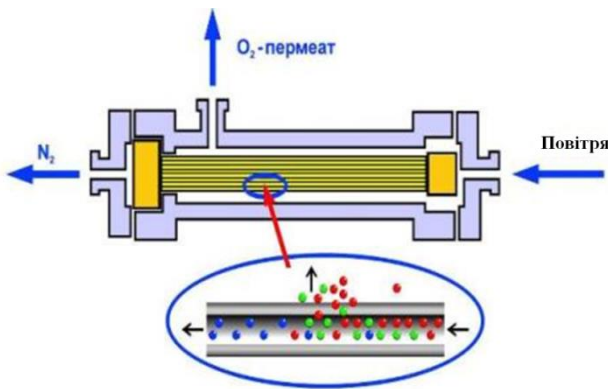


Рисунок 5.22 – Схема одержання азоту мембранним способом

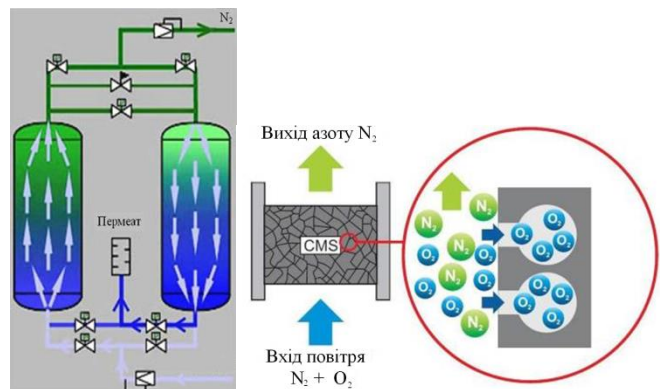


Рисунок 5.23 – Схема одержання азоту адсорбційним способом

5.5.4. Консервація та зберігання продуктів перероблення у харчовій промисловості

5.5.4.1. Ефективність застосування азоту при виробництві, упаковуванні та зберіганні харчових продуктів

Використання контрольованого газового середовища при виробництві, упаковуванні та зберіганні продуктів харчування дозволяє:

- у кілька разів збільшити термін їх зберігання;
- звести до мінімуму або повністю виключити застосування консервантів;
- значно зменшити повернення прострочених продуктів;
- збільшити обсяги реалізації екологічно чистих продуктів і розширити географію продажів;
- виробляти принципово нові продукти;
- упаковувати продукти у привабливу упаковку;
- істотно знизити собівартість продукції і вплив людського фактора на виробничий процес при заміні вже існуючого устаткування для подачі газоподібного азоту балонними системами і газифікаторів перегонки рідкого азоту. Відмовитися від закупівлі, транспортування азоту й супутніх витрат під час використання застарілої технології;
- виключити пожежо- і вибухонебезпечні ситуації.

5.5.4.2. Застосування газоподібного азоту на фрукто- та овочесховищах

На сьогодні різко зростає необхідність тривалого зберігання овочів і фруктів із мінімальними втратами. Застосування контрольованого інертного середовища із вмістом кисню до 5 % дозволяє довго зберігати харчові продукти рослинного походження, які тоннами псуються у звичайних сховищах. Завдяки системі контролю за газовим середовищем у приміщенні з'являється можливість

підтримки підходящого інертного середовища з максимальним вмістом газоподібного азоту.

Використання азотних станцій і установок виробництва ТОВ «МІКЕМ» для зберігання плодів у регульованій атмосфері дозволяє попередити низькотемпературні захворювання яблук і деяких інших культур; знизити рівень уразливості плодів різними фізіологічними захворюваннями (плямистістю, побурінням шкірочки, зів'яненням); довше зберегти свіжий смак, аромат і консистенцію м'якоти; різко (утричі та більше разів) знизити природний збиток маси; зменшити відходи плодів за рахунок їх дозрівання і більш високої стійкості проти мікробіологічних і фізіологічних захворювань.

Більш висока лежкість плодів у холодильниках з регульованим газовим середовищем обумовлена спільним впливом низьких температур (вище 0 °С) і газової суміші зі зниженим вмістом кисню. Зниження його концентрації приглушує біосинтез природного стимулятора дозрівання – етилену і цим затримує дозрівання плодів.

Інертне середовище приглушує декарбоксілювання яблучної кислоти і накопичення ацетальдегіду, що у більших концентраціях токсичні для рослинних тканин (рис. 5.24).



Рисунок 5.24 – Застосування газоподібного азоту на фрукто- та овочесховищах

5.5.4.3. Застосування газоподібного азоту для зберігання зернових культур

Використання азотного середовища при зберіганні зерна злакових, бобових, олійних культур і зернопродуктів дозволяє:

- збільшити термін зберігання зернопродуктів, дотримуючись при цьому первинних якісних показників, а також життєздатність, генетичну цілісність і силу росту посівних матеріалів;
- істотно скоротити енергетичні витрати і споживання інших ресурсів при зберіганні зернопродуктів, тим самим зменшивши його вартість;
- виключити використання токсичних хімічних фумігантів, застосовуваних для знищення шкідників, забезпечуючи при збереженні гігієнічну чистоту сільгосппродукції. Це дуже важливо для її експорту, тому що на світових ринках стають усе жорсткішими вимоги екологічного характеру. Після фумігації зерна хімічним способом залишки отрутих з'єднань стовідсотково видалити неможливо;
- запобігти втратам і зараженням зерна, одержуваних у результаті життєдіяльності шкідників і уражувальної мікрофлори;
- звести до мінімуму механічні ушкодження зерна у процесі зберігання;
- знизити ймовірність загоряння, що може мати місце при зберіганні недостатньо сухих зернопродуктів.

В ізольованій системі сховища «дихальний» метаболізм комах, цвілевих грибків і зерна «самостійно» знижують концентрацію кисню і підвищують вміст діоксиду вуглецю в міжзерновому просторі до рівня, коли дихання шкідників, комах стає неможливим. Це – основний принцип зберігання зерна в герметичних умовах. Безумовною перевагою герметичних сховищ з інертним середовищем азоту є додатковий опір вторгненню комах і мікрофлори з довкілля (рис. 5.24).



Рисунок 5.25 – Застосування газоподібного азоту для зберігання зернових культур

5.5.4.4. Застосування азоту в масложировій промисловості

Характеристики якості жирів і масел або харчових продуктів із високим їх вмістом завжди забезпечуються запобіганням окисненню, що є найбільш важливим механізмом псування цих видів продуктів. У даному контексті під окисненням розуміють хімічну реакцію ланцюжків жирних кислот молекул тригліцеридів з атмосферним киснем. Такий вплив кисню може відбуватися за температури довкілля або за більш низьких температур, наприклад, за нормального зберігання масел або готових харчових продуктів. Це також може відбуватися за більш високих температур, наприклад, під час готування або обсмажування в жирі.

Для захисту масла і поліпшення його стабільності не можна допускати впливу на нього кисню від самого початку – з моменту одержання масла. Ефективною альтернативою є використання азоту в харчовій промисловості, важливість цього варіанта зростає у зв'язку із загальносвітовою тенденцією заміни фізико-хімічних методів консервації більш м'якими методами.

Азот є хімічно інертним газом, що безпосередньо не взаємодіє з продуктом. Азот використовується для витіснення атмосферного повітря і, таким чином, для кисню з парама води, що дозволяє запобігти окисненню.

Кисень замінюється азотом використанням двох різних методів: барботажу, за допомогою якого видаляється розчинений кисень, і заповнення, за допомогою якого забезпечується відсутність кисню у вільному просторі. Заповнення азотом є корисним для збірних баків, використовуваних для проміжних фракцій масел, а також для баків зберігання неочищеного та готового масла.

Азот використовується для насичення дезодорованого масла після дезодорації й охолодження для захисту від окиснення, а також для насичення масла під час фасування в ПЕТ-тару. Так само при виробництві жирів і майонезу азот використовується для так званого збивання. Його основною метою є зміна консистенції продукту. Цей метод переважно застосовується для жирів, використовуваних для хлібобулочних виробів, і дозволяє одержати необхідну щільність за допомогою інертного газу та запобігти впливу повітря (рис. 5.26).



Рисунок 5.26 – Застосування азоту в масложировій промисловості

5.5.4.5. Збільшення терміну зберігання продуктів

Охолоджене м'ясо і напівфабрикати, свіжа риба, м'ясні та ковбасні вироби, сир, свіжий хліб, овочі і фрукти, рослинна олія, молоко та молочні продукти, чипси, сухарики, горішки, майонез і кетчупи, вино, пиво, соки та багато чого іншого – це і є те, що виробляє харчова промисловість. Вимоги споживачів до якості харчових продуктів збільшуються, загальне негативне ставлення до консервантів привело до розвитку технологій упакування так званій модифікованій атмосфері – MAP (Modified Atmosphere Packaging).

Якщо покупець уважно вивчає написи на упаковці харчових продуктів, то, крім інформації про склад, білки, вуглеводи і т. п., можна прочитати таке: «Упаковане в захисній атмосфері», «Packed in protective atmosphere». Це означає, що привабливий зовнішній вигляд і висока якість харчових продуктів і напівфабрикатів, що зберігаються упродовж тривалого часу, забезпечується MAP усередині упаковки. Коли спеціальна харчова атмосфера використовується для збереження високої якості продукту, хімічні добавки часто можна не використовувати.

5.5.4.6. Упаковування продукції

5.5.4.6.1. Упаковування харчових продуктів у нейтральному середовищі

Продукт, упакований у модифікованій атмосфері за допомогою азоту з умістом кисню менше ніж 1 %, зберігається в кілька разів довше від звичайного, зберігаючи той самий смак, що був у нього в день виготовлення. Крім того, невеликий надлишковий тиск допомагає зберегти форму упаковки, гарантуючи її привабливість для споживача.

Азот використовується для видалення кисню і збереження свіжості продуктів – харчових масел, приправ та майонезу. Повітря в резервуарах зберігання замінюється азотом, що також уводиться в упаковку для продовження термінів зберігання продуктів харчування.

Газове середовище є ідеальним для снєків (горішків, картопляних чипсів, інших закусок), тому що вони містять жир, що може швидко прогіркнути. Термін зберігання можна збільшити від тижнів до кількох місяців без застосування яких-небудь хімічних добавок. Є значний попит на напівфабрикати і готові продукти різного роду. Вони можуть виставлятися у вітринах з холодильниками в привабливій упаковці, що містить спеціально розроблену атмосферу зберігання (рис. 5.27, табл. 5.2).



Рисунок 5.27 – Упаковування харчових продуктів у нейтральному середовищі

5.5.4.6.2. Упаковування та зберігання м'ясних виробів

Звичайним газовим середовищем, використовуваним для упакування ковбас, сосисок, м'ясних напівфабрикатів та іншої м'ясної продукції, звичайно, є суміш азоту з вуглекислим газом. Самостійне виробництво двоокису вуглецю є технічно складним, а часто ще й досить небезпечним. Більшість незначної кількості споживачів вуглекислого газу, до яких можна віднести й підприємства харчової промисловості, не мають можливості самостійно виробляти CO₂, оскільки це було б і не виправданим із фінансової точки зору.

Проте у споживачів пакувальних газових сумішей у м'ясопереробній промисловості є спосіб багаторазово скоротити витрати шляхом самостійного виробництва азоту і подальшого готування суміші із цього азоту та купівельного двоокису вуглецю, якого потрібна незначна кількість. Собівартість N₂ при цьому на порядок знижується, а сама установка разом із допоміжним устаткуванням, витратами на електроенергію та обслуговування, повністю окупується за термін від одного року, а в деяких випадках і за менший проміжок часу.

Більшість м'ясопереробних підприємств світу, а також багато підприємств цієї галузі в країнах СНД давно використовують промислові азотні установки для створення модифікованої атмосфери при зберіганні своєї продукції.

Азотні станції й установки виробництва компанії ТОВ «МІКЕМ» – це надійне, сучасне й економічно ефективно устаткування для виробництва газоподібного азоту зі стисненого повітря. Це дає гарантії споживачеві на постачання його виробничих потужностей високоякісним азотом необхідної чистоти, водночас дозволяючи на порядок скоротити вартість газу за рахунок виробництва азоту з повітря безпосередньо на місці його споживання (рис. 5.28).

Таблиця 5.2 – Склад модифікованої атмосфери залежно від виду продукту

Продукти споживання	Склад газової суміші, %			Температура зберігання, °С	Термін зберігання, днів
	O ₂	CO ₂	N ₂		
М'ясо:					
– сире м'ясо	30	30	40	0–2	5–8
– м'ясо птаха	–	30	70	0–2	14–21
– ковбаси, сосиски	–	0–20	80–100	2–5	30
Риба:					
– риба пісна	30	40	30	2–5	5–7
– риба жирна	–	60–70	30–40	2–5	5–7
– риба копчена	–	10–15	85–90	2–5	7–20
– приготовлена риба	–	20	80	2–5	30
Молочні продукти:					
– сир твердий	–	80	20	2–5	30–90
– сир легкий	–	20–40	40–60	2–5	20
– сир	–	0–20	80–100	0–2	20
– вершки	–	–	100	0–2	20
Приготовлені продукти:					
– піца	–	30–60	40–70	2–5	14–35
– салати під соусом	–	–	100	2–5	14–21
– рубане м'ясо	–	20	80	2–5	28–35
Овочі, фрукти:					
– зелень, салат, гриби	3–10	3–10	90	2–5	7–10
– очищена картопля	–	40–60	40–60	2–5	10
– томати	3–5	0	95–97	8–12	декілька міс.
– яблука	2–3	1–2	95–98	0–5	декілька міс.
– полуниця	10	15–20	70–75	0–5	14–20

Продовження таблиці 5.2

Випічка:					
– тістечко	–	50–70	30–50	2–5	14–21
– кекс	–	20–40	60–80	20–25	1 рік
– житній хліб	–	20–40	60–80	20–25	14
– бісквіти	–	–	100	20–25	4–6 міс.
– пісочне печиво	–	–	100	20–25	30–60
Інші продукти:					
– кава мелена	–	–	100	5–20	6–12 міс.
– сухе молоко	–	–	100	5–20	12 міс.
– фруктові соки	–	–	100	5–20	6–12 міс.
– чипси, снеки	–	–	100	5–20	6–9 міс.
– горіхи, насіння	–	–	100	5–20	6–12 міс.



Рисунок 5.28 – Упакування та зберігання м'ясних виробів

Безліч українських і закордонних м'ясокомбінатів, як великих, так і не дуже, дійшли до використання азоту власного виробництва за допомогою установок газорозділення. Це дозволило їм значно скоротити витрати підприємства на постачання виробництва азотом – без затримок поставки, при постійно високій якості газу, без необхідності постійного навантаження, вивантаження і транспортування балонів, огляду їх та інших газових ємностей у державних органах контролю.

5.5.4.7. Устаткування і використовувані технології

Для одержання газоподібного азоту концентрацією від 90 до 99,5 % використовуються газороздільні мембрани, для газоподібного азоту концентрацією від 95 до 99,9999 % – газороздільні блоки адсорбційного типу. Установки %. Для деяких підприємств азот концентрацією до 99,5 % можна застосовувати в технологічних процесах. Із цією метою фахівці концерну «НІКМАС» пропонують споживачам установки одержання азоту адсорбційного типу на базі устаткування «Oxumat» (Данія) і «Domnick hunter» (Англія). Газороздільний блок складається з двох колон, заповнені адсорбентом. На виході з блока азот збирається в ресивері, звідки йде на споживання (рис. 5.29–5.31).



Рисунок 5.29 – Фірни-виробники, залучені до комплектації устаткування



Рисунок 5.30 – Газороздільний блок

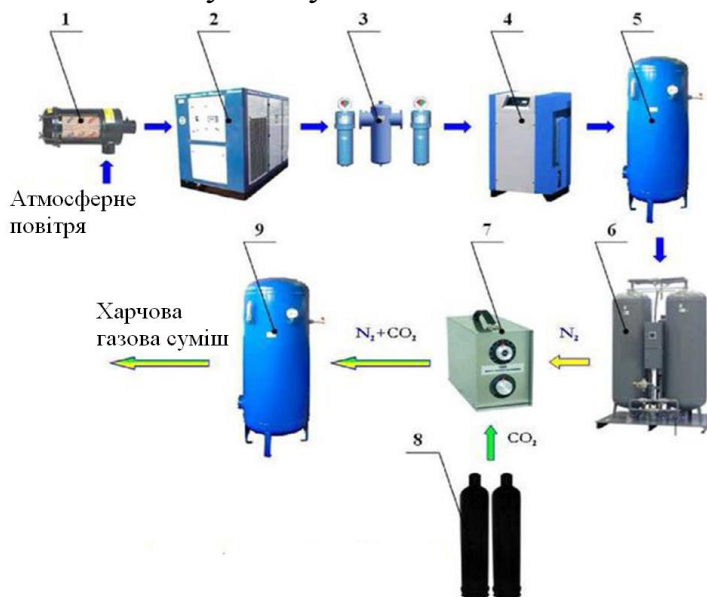


Рисунок 5.31 – Одержання харчової газової суміші:

- 1 – повітряний фільтр; 2 – компресорна станція; 3 – система очищення у вологовіддільнику; 4 – блок підготовки повітря; 5 – ресивер повітря; 6 – установка одержання азоту адсорбційного типу; 7 – змішувач, 8 – балони з CO₂; 9 – ресивер харчової суміші

Установки одержання азоту і приклади їх застосування наведені нижче: АМ -1,7/0/,4 АБ УЗ для харчової промисловості подано на рис. 5.32 і в табл. 5.3, АМ-1,2/0/,9 А УЗ для харчової промисловості – на рис. 5.33–5.37 і в табл. 5.4–5.8).

Таблиця 5.3 – Технічні характеристики установки АМ-1,7/0/,4 АБ УЗ

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, м ³ /хв	1,7
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,4
Концентрація азоту, %	до 99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 500×600×2 000
Маса установки, кг	800

Таблиця 5.4 – Технічні характеристики установки АМ-1,2/0/,9 А УЗ

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, м ³ /хв	1,2
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,9
Концентрація азоту, %	до 99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 400×2 300×2 000
Маса установки, кг	1 050

Таблиця 5.5 – Технічні характеристики установки

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	0,5
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,6
Концентрація азоту, %	99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	4 000×2 400×2 500
Маса установки, кг	3 500
Клімат. виконання	У1



Рисунок 5.32 – Установки
АМ-1,2/0,9 А У3



Рисунок 5.33 – Установки
АМ-1,7/0,4 АБ У3



Рисунок 5.34 – Азотна станція (харчова
промисловість, СНД)



Рисунок 5.35 – Установка одержання азоту (харчова промисловість, Україна, Запорізька обл.)

Таблиця 5.6 – Технічні характеристики установки

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	1,7
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,4
Концентрація азоту, %	99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 500×600×2 000
Маса установки, кг	800
Клімат. виконання	У3

В установці реалізована технологічна схема одержання азоту без джерела стисненого повітря (компресора) і блока осушування (холодильного осушувача), які забезпечує споживач.



Рисунок 5.36 – Установка одержання азоту (харчова промисловість, Україна, м. Запоріжжя)



Рисунок 5.37 – Станція азотна (харчова промисловість, Україна, м. Одеса)

Таблиця 5.7 – Технічні характеристики установки

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	1,2
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,9
Концентрація азоту, %	99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 400×2 300×2 000
Маса установки, кг	10 500
Клімат. виконання	У3

Таблиця 5.8 – Технічні характеристики установки

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	0,037
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,6
Концентрація азоту, %	99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 900×900×900
Маса установки, кг	400
Клімат. виконання	У3

5.5.5. Станції азотні переносні для різних галузей промисловості

Станції азотні переносні широко використовуються в інших галузях промисловості: машинобудуванні, металургії, фармацевції, коксохімії, хімічній галузі (рис. 5.38–5.44, табл. 5.9–5.14)

Таблиця 5.9 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	3,7; 3,33; 0,4
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	1,4; 0,5; 0,5
Концентрація азоту, %	до 99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	4 000, 2 500×2 438×3410, 2 500
Маса установки, кг	5 000; 2 500
Потужність, споживана станцією, не більша ніж, кВт	90, 110
Клімат. виконання	У1



Рисунок 5.38 – Станція азотна переносна (машинобудування, Львівська обл., енергетика, Черкаська обл.)



Рисунок 5.39 – Станція азотна переносна (металургія, Білорусь, м. Мінськ)

Таблиця 5.10 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	0,28
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,7
Концентрація азоту, %	99,0
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 500×600×2 000
Маса установки, кг	800
Клімат. виконання	У3

Таблиця 5.11 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	0,39
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	1,2
Концентрація азоту, %	99,0
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	2 000×1 000×2 300
Маса установки, кг	1 150
Клімат. виконання	У3

Таблиця 5.12 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, нм ³ /хв	2,2
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,65
Концентрація азоту, %	до 99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	2 500×1 000×2 000
Маса установки	1 800
Клімат. виконання	У3



Рисунок 5.40 – Станція азотна переносна (фармацевтична галузь, Київська обл.)



Рисунок 5.41 – Азотна станція переносна (машинобудування, Білорусь)



Рисунок 5.42 – Переносна азотна станція (металургія, Луганська обл.)



Рисунок 5.43 – Установка одержання азоту (коксохімія, Донецька обл.)



Рисунок 5.44 – Станція азотна (хімічна галузь, Україна, Луганська обл.)

Таблиця 5.13 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, $\text{нм}^3/\text{хв}$	5
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,7
Концентрація азоту, %	99,5
Компресорний модуль із блоком системи автоматики і контролю	
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	2 110×1 270×1 922
Маса модуля, кг	2 500
Газороздільний модуль із блоком підготовки стисненого повітря	
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	2 300×1 400×1 050
Маса модуля, кг	1 050

Таблиця 5.14 – Технічні характеристики станції

Назва параметра, одиниця вимірювання	Значення
Продуктивність за азотом, $\text{нм}^3/\text{хв}$	0,88
Тиск надлишковий кінцевий, МПа	0,7
Концентрація азоту, %	до 99,5
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 050×800×2 000
Маса установки, кг	330
Клімат. виконання	У3

В установці реалізована технологічна схема одержання азоту без джерела стисненого повітря (компресора), що забезпечує споживач.

5.5.6. Зберігання зернових у контрольованому нейтральному середовищі азоту

Азотна станція змонтована на елеваторі в м. Карлівці Полтавської області. Застосовується для заповнення силосу газоподібним азотом. Потужність елеватора – 70 000 тонн (рис. 5.45). Станція була змонтована в 2004 році на Сумському комбінаті хлібопродуктів Державної акціонерної компанії «Хліб України», де разом із розроблювачами та Інститутом захисту рослин оцінено вплив газового азотного середовища на динаміку видового складу і кількості зернових шкідників (рис. 5.46).



Рисунок 5.45 – Азотна станція на елеваторі (м. Карлівка, Полтавська область)



Рисунок 5.46 – Азотна станція на хлібокомбінаті (м. Суми)

5.5.7. Заливання пропан-бутаном вагонів-цистерн

Станція азотна переносна АМГП-0,25/0,7 С У1 застосовується на ВАТ «Полтавахіммаш» (м. Полтава) для витіснення кисню з вагонів-цистерн, що готуються для заливання СУГ (рис. 5.47). Газоподібний азот, що виробляється станцією, подається в цистерни для витіснення кисню до залишкового вмісту 1 % і надлишкового залишкового тиску 0,5–0,7 кгс/см².



Рисунок 5.47 – Азотна переносна станція АМГП-0,25/0,7 С В1 (ВАТ «Полтавахіммаш», м. Полтава)

5.6. Системи охолодження та холодозабезпечення для устаткування і технологічних ліній

У виробничих циклах, пов'язаних із термодинамічними процесами, найчастіше виникає необхідність відведення теплоти для забезпечення нормальної працездатності машин та механізмів, безпечної життєдіяльності людей і т. п. Для виконання цього завдання застосовують системи охолодження. Наприклад, працездатність пересувної компресорної установки НД 24/120 забезпечують блок охолоджувачів масла і повітря першого та другого щаблів гвинтового компресора, блок охолоджувачів повітря п'яти щаблів поршневого компресора, радіатор охолодження тосолу дизеля, охолоджувач масла гідропривода, підігрівач масла картера поршневого компресора (рис. 5.48).



Рисунок 5.48 – Пересувна компресорна установка НД-20/120 зі знятим кузовом

ТОВ «МІКЕМ» розробляє і виготовляє комплексні системи охолодження різного технологічного устаткування (компресорні і турбодетандерні установки, системи підготовки газу, бурові установки, прохідницькі комбайни та ін.) на базі ефективних рекуперативних теплообмінників пластинчасто-ребристого, пластинчастого і трубчастого типів із робочим тиском середовища до 50 МПа. Є досвід проектування систем охолодження газів (повітря, азоту, водню, вуглекислого газу), продуктів видобутку і перероблення вуглеводневої сировини (природний і попутний нафтовий газ, метан, пропан-бутанові суміші, коксовий газ), рідин (масло, вода, гліколеві суміші, антифриз), харчові продукти (молоко, харчова вуглекислота) (рис. 5.49).

Крім того, для різних технологічних ліній, систем кондиціонування та вентиляції проектують і виготовляють системи холодозабезпечення із застосуванням сучасних високотехнологічних поршневих, гвинтових і спіральних компресорів (рис. 5.50).

Для підтримки і регулювання заданих параметрів широко використовуються автоматичні системи керування, зокрема смарт-системи віддаленого моніторингу та керування за допомогою модема-роутера і звичайної SIM-картки будь-якого оператора (рис. 5.51).

Устаткування експлуатується практично у всіх кліматичних зонах – від крайньої півночі до сухих і вологих тропіків (Іран, Узбекистан, В'єтнам, Бангладеш та ін.). Устаткування може бути виготовлене в корозійностійкому й вибухобезпечному виконанні.



Рисунок 5.49 – Охолоджувач антифризу бурового верстата СБШ-160/200-40Д із дизельним приводом



Рисунок 5.50 – Система охолодження компресора для стиснення харчової вуглекислоти

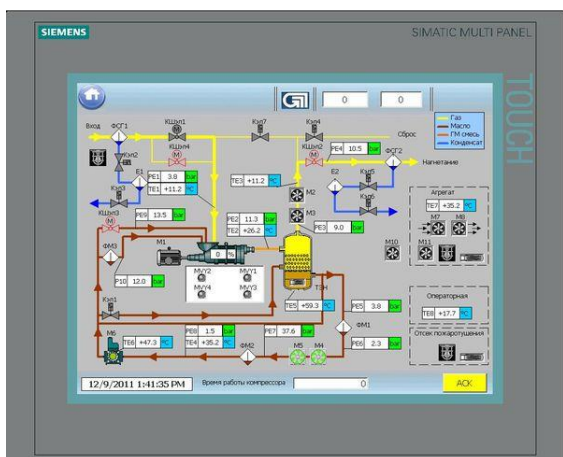


Рисунок 5.51 – Віддалений моніторинг роботи установки

Удосконалювання технологічного устаткування, поліпшення його технічних характеристик є необхідними для підвищення технічних характеристик системи охолодження і, зокрема, теплообмінних апаратів. Завдання полягає в збільшенні терміну безвідмовної роботи системи в умовах вібраційних навантажень, збільшенні терміну між профілактичними очищеннями теплообмінників від забруднень, зменшенні маси та габаритів.

5.7. Системи утилізації і рекуперації тепла

Ціни на енергоносії, що постійно зростають, змушують значною мірою переглянути підходи до енергоефективності експлуатованого устаткування. Наприклад, у гвинтовій маслозаповненій компресорній установці вся електрична енергія на привід компресора фактично перетвориться на теплову. При цьому понад 90 % цього тепла відводиться у довкілля системою охолодження компресорної установки. Водночас для забезпечення різних технологічних циклів, побутових потреб в опаленні та гарячому водопостачанні використовується додаткове тепло від стороннього джерела (котельня, ТЕЦ та ін.). Застосування системи рекуперації тепла дозволяє зберегти більше ніж 70 % теплової енергії, що відводиться від компресорної установки, спрямувавши його на підігрівання во-

ди або інших технологічних рідин. Система рекуперації (рис. 5.52) вбудовується в масляний контур компресора і складається, як правило, з теплообмінника «масло – вода» (можливе застосування додаткового теплообмінника «повітря – вода»), запірно-регулювальної арматури, циркуляційного насоса (за необхідності) і з'єднувальних трубопроводів.

Для створення системи рекуперації необхідно знати технічні характеристики компресора, режим його роботи, якісну і кількісну характеристику споживаної гарячої води. Варіантів рекуперації досить багато: від прямого нагрівання артезіанської води до роботи в складі індивідуальних або центрального теплових пунктів. Деякі спрощені технологічні схеми показані на рис. 5.53.

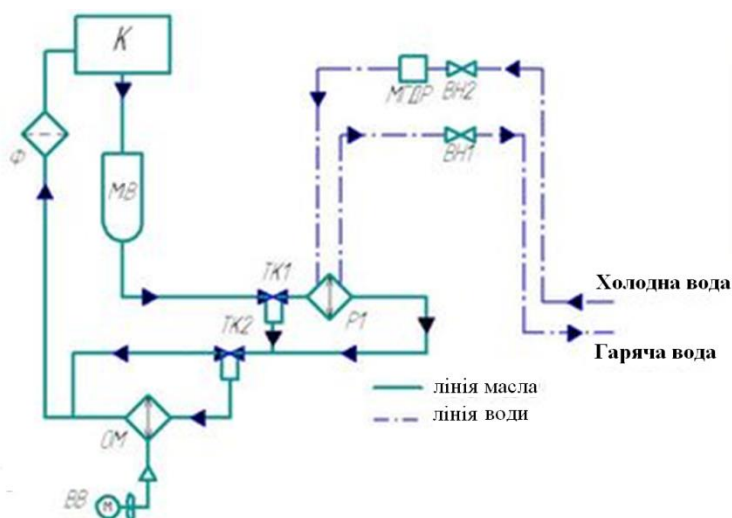


Рисунок 5.52 – Схема рекуперації тепла гвинтового маслозаповненого компресора:

О – охолоджувач масла; ВН1, ВН2 – кран кульовий; МГДР – МГД резонатор; Р1 – рекуператор; Ф – фільтр; ВВ – вентилятор; РТ1, РТ2 – термостатичний клапан; МВ – масловіддільник

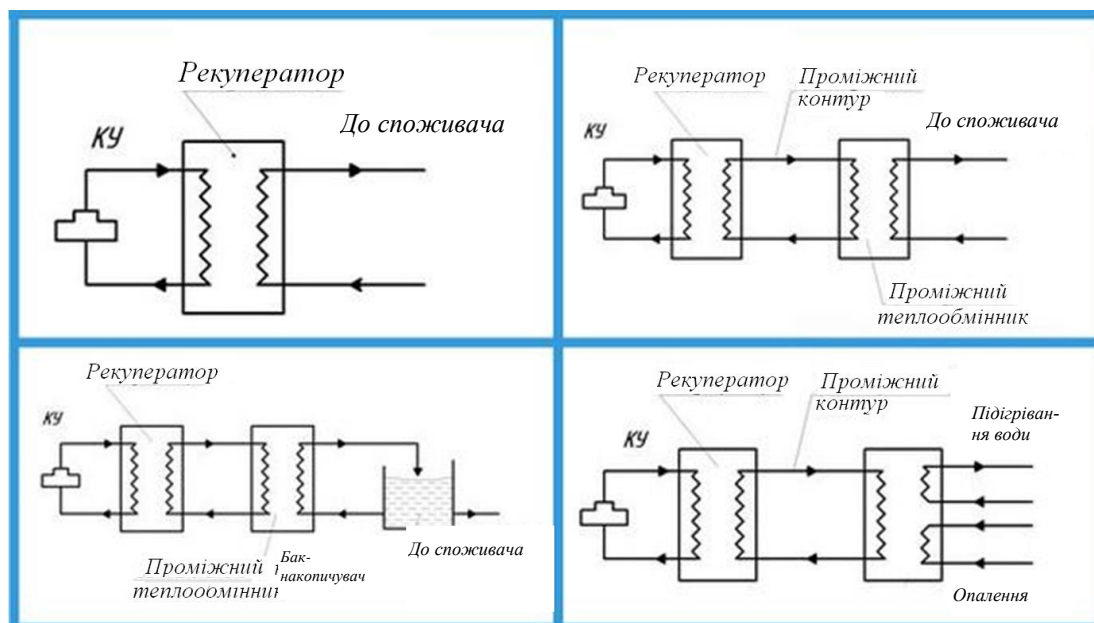


Рисунок 5.53 – Типові схеми рекуперації тепла гвинтових маслозаповнених компресорів

Не менш значущою є утилізація енергії джерел низькопотенційного тепла. Як такі джерела можуть використовуватися водовідлив вугільних і рудникових шахт, стічні води, тепло, газу, що відходять, металургійних та інших виробництв, тепло вихідного струменя шахтного провітрювання, енергія низькопотенційної пари турбін, зокрема з нестабільними параметрами, джерела природного походження (тепло землі, води, сонячна енергія та ін.).

Системи утилізації розробляються на базі високоефективних теплових насосів парокompресійного та абсорбційного типів, парогвинтових машин та іншого устаткування (рис. 5.54).

Для підтримки і регулювання заданих параметрів широко використовуються автоматичні системи керування, зокрема смарт-системи віддаленого моніторингу і керування за допомогою модема-роутера та звичайної SIM-картки будь-якого оператора.

Використання систем утилізації джерел низькопотенційного тепла дозволяє додатково виробляти теплову й електричну енергію, знизити експлуатаційні витрати на виробництво енергії, поліпшити екологічну обстановку.

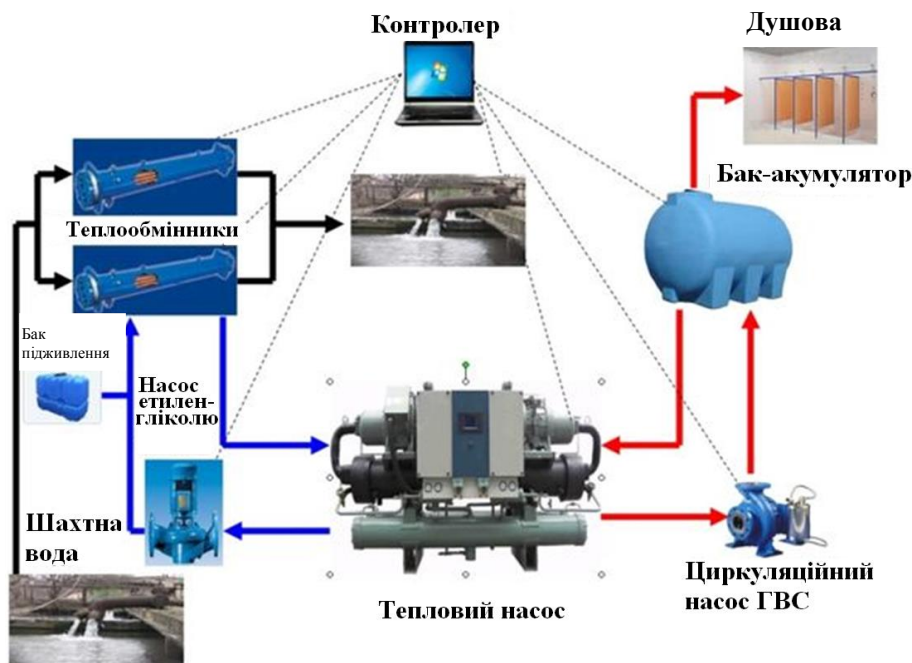


Рисунок 5.54 – Приклад утилізації тепла шахтної води за допомогою теплового насоса парокompресійного типу

5.8. Компресорна техніка в розвитку залізничного транспорту

5.8.1. Компресорна техніка для рухомого складу залізничного транспорту

Для забезпечення безперебійного транспортного процесу, а також для технологічних процесів, спрямованих на підтримку справного стану тягового парку (локомотиви), моторвагонного (електропоїзди, дизель-поїзди, рейкові ав-

тобуси), спеціального самохідного (автомотриси, шляхові машини), нетягового (вантажні і пасажирські вагони) рухомого складу і залізничних колій важливу роль відіграє застосування стисненого повітря як джерела енергії (табл. 5.15).

Велику кількість компресорних станцій на залізниці обладнано фізично застарілими поршневыми компресорами з водяним охолодженням, що мають низькі коефіцієнти корисної дії та надійність, особливо під час роботи в зимовий час. Переобладнання компресорних станцій входить до програм модернізації залізничного транспорту України.

Для реконструкції й модернізації успішно застосовується компресорна техніка виробництва концерну «НІКМАС». У період з 2002 по січень 2011 р. на підприємства залізничної інфраструктури концерн доставив 642 одиниці компресорного устаткування (рис. 5.55). Компресорні станції концерну на базі гвинтових блоків для стиску повітря, обладнані повітряним охолодженням і вдосконаленою системою очищення повітря від масла і вологи, дозволяють створити сучасну надійну енергозбережну систему постачання стисненим повітрям залізничних станцій. Гарантійний термін роботи гвинтового блока, що не має в тракті стискання повітря третьових деталей, становить 40 000 годин роботи. За результатами енергоаудиту, здійснюваного співробітниками концерну, розробляються раціональні схеми розміщення компресорних установок на території станції для її забезпечення стисненим повітрям із мінімальними втратами в мережах і мінімальних витратах електроенергії.

Таблиця 5.15 – Застосування стисненого повітря на залізниці

Структурний підрозділ залізниці	Сфера застосування стисненого повітря	Компресорне устаткування виробництва концерну «НІКМАС»
ЦВ Вагонне господарство	Пневмосистема вагонних депо	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ, серія БКУ
	Пристрої зарядки й апробування гальм	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ
ЦТ Локомотивне господарств	Пневмосистема локомотивних депо	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ, серія БКУ
	Пристрої зарядки й апробування гальм	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ
ЦЛ Пасажирське господарств	Пневмосистема моторвагонних депо	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ, серія БКУ
	Пристрої зарядки й апробування гальм	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ
ЦП Шляхове господарство	Обдування стрілкових переведень	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ, серія БКУ
	Вагонні сповільнювачі на сортувальних гірках	Серія НВЕ, серія ВВ, серія ВВУ
	Будівництво і ремонт шляху	Серія ВВП, серія ПКСД
ЦШ Сигналізація і зв'язок	Пневмопошта	Серія ВР

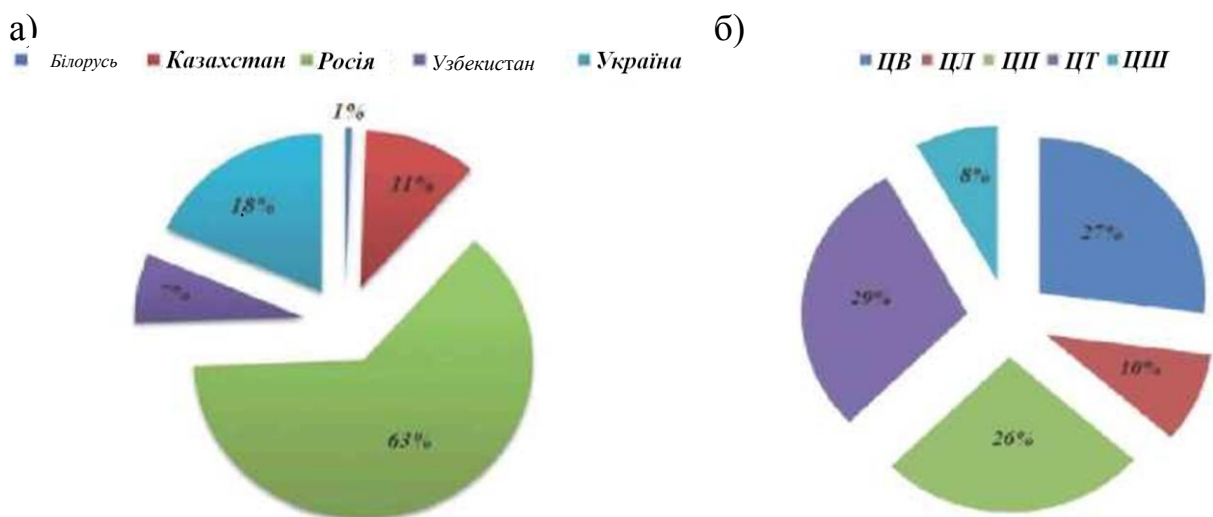


Рисунок 5.55 – Аналіз поставок компресорного устаткування концерну «НІКМАС» на залізниці: а) за країнами; б) за структурними підрозділами залізниць

Гвинтові компресорні станції серії НВЕ, застосовувані на залізницях (рис. 5.56), мають широкий діапазон продуктивності (табл. 5.16), що дозволяє здійснити комплектацію залізничної станції оптимальним складом компресорної техніки. Виконання станцій дозволяє експлуатувати їх у всіх кліматичних зонах країни. Станції НВЕ обладнані системами дистанційного керування і віддаленого моніторингу та можуть працювати в автоматичному режимі під контролем із центрального пульта.

Таблиця 5.16 – Технічна характеристика гвинтових компресорних станцій серії НВТ з електроприводом і повітряним охолодженням

Назва параметра	НВЕ-6/10У2	НВЕ-10/07МУ3	НВЕ-10/07БУ3	НВЕ-12/07У3	НВЕ-12/09У3	НВЕ-15/07У3	НВЕ-20/08У3	НВЕ-22/07У3
Об'ємна продуктивність, м ³ /хв	6	10	10	12	12	15	20	22
Кінцевий тиск, МПа	0,95	0,7			0,9	0,7	0,8	0,7
Потужність споживана, не більше, кВт	50	74	80	84	95	110	141	152
Температура повітря кінцева, °С	60	65	60			65	55	60
Габаритні розміри (довжина×ширина×висота), мм	1 700×950×1500	1 870×1120×1800	1 560×1 300×1 740	2 160×1 430×2 080		2 330×1 510×1 940	2 710×1 580×2 170	2 500×1 870×1 900
Маса станції, кг	1300	1500	1 460	2 150	2 400	2 450	2 800	3 000

При будівництві нових доріг, реконструкції і ремонті діючих необхідні мобільні, економічні, енергонезалежні установки для одержання стисненого повітря. Концерн «НІКМАС» освоїв серійний випуск пересувних гвинтових компресорних станцій із дизельним приводом серії ВВП (рис. 5.57), експлуатація яких можлива на всій території України. Основними перевагами даних станцій, які замінили станції з поршневіми компресорами, є простота в експлуатації, надійність та економічність. Вони характерні високими маневреністю і про-

хідністю за рахунок застосування одноосьового шасі, можуть транспортуватися як причіп автомобілем або на залізничній платформі.



Рисунок 5.56 – Гвинтова компресорна станція НВЕ-10/0,7



Рисунок 5.57 – Пересувна гвинтова компресорна установка ВВП-6/7, продуктивність 6 м³/хв, тиск 0,7 МПа

Надійність рухомого складу залізничного транспорту значною мірою залежить від безвідмовної роботи його пневматичної системи. Стиснене повітря є традиційним, випробуваним упродовж століття, робочим енергоносієм у гальмовій системі залізничного транспорту та інших його пневматичних пристроях. Основною ланкою у пневматичній системі рухомого складу є компресор локомотива. Він забезпечує безперервне постачання стисненим повітрям гальмову систему самого локомотива та усього складу поїзда. Крім того, стиснене повітря приводить в дію системи керування автоматичними дверима пасажирських вагонів, контактними струмоприймачами, подача абразивної суміші при пробуксовці коліс та ін. Компресори в складі локомотива перебувають у дуже жорстких умовах як за температурами навколишнього повітря, так і за рівнем віброприскорень. Діапазон температур, за яких повинен надійно працювати компресор, за вимогами стандарту повинен бути від -55 до $+65$ °С, а реально досягає до $+80$ °С. Нижнє значення обумовлене вимогами стійкого запуску компресора на електровозах, що експлуатуються в умовах крайньої півночі. При верхньому значенні температури компресори експлуатуються у відсіку головного дизеля тепловоза за високої зовнішньої навколишньої температури. Не менш стійкі норми за впливом зовнішньої вібрації, прискорень й одиничних ударів. Компресор, розміщений на шасі локомотива, перебуває під дією вібраційного навантаження в широкому діапазоні частот – від малоциклових до високочастотних.

На сьогодні до локомотивів ставлять більш високі вимоги до міжремонтних пробігів і термінів служби. Тому ці вимоги безпосередньо переносяться і на його складові. З огляду на особливу відповідальність локомотивного компресора як джерела пневматичної енергії для гальмової системи, до нього насамперед ставлять підвищені. Наприклад, ресурс до середнього ремонту повинен бути не меншим ніж 1 000 000 км, а до капітального ремонту – не меншим ніж 2 400 000 км пробігу. Термін служби локомотива до списання – не менший ніж 40 років. Вимоги до гальмових систем зростають через збільшення маси потягів і швидкості пересування.

Основним постачальником компресорів для локомотивів понад п'ятдесят років є Полтавський завод АТ «ПТМЗ» концерну «НІКМАС». Гальмові порш-

неві компресори серії КТ становлять багаторічну продукцію заводу. Технічні рішення, закладені в конструкцію компресорів типу КТ (КТ6, КТ7, КТ6Ел), запас міцності та надійність обумовили їх серійне виробництво. За роки серійного виробництва випущено більше ніж 100 тис. поршневих компресорів цієї моделі. Компресори КТ6 експлуатуються в складі цілого ряду магістральних локомотивів, таких як ТЕМ18Д, ВЛ80, ВЛ10, 2Т10, ВЛ12, ВЛ85, ДЕ1, ТЕП60 та ін. (табл. 5.17).

Сучасні тенденції розвитку залізничного транспорту, що передбачають істотне підвищення швидкості руху, збільшення продуктивності при формуванні вантажних потягів, розширення мережі електрифікованих доріг і неодмінне підвищення безпеки, вимагають освоєння нової техніки в залізничних компресорах. Новим підвищеним вимогам до залізничних локомотивів відповідають гвинтові компресори, активно впроваджувані на рухомий склад залізничного транспорту. На відміну від поршневого гвинтовий компресор входить до складу автономного агрегата із системою окремих вузлів, що дозволяють одержати на виході стиснене повітря високої якості, які не містять механічних домішок, масла, води та їх парів. Значних успіхів у впровадженні гвинтових компресорів на залізничному транспорті досягли такі світові компанії-виготовлювачі, як Knorr Bremse, Atlas Copco, Gardner Denver.

Таблиця 5.17 – Застосування гальмових компресорів концерну «НІКМАС» на тяговому рухомому складі

Марка компресора	Тип компресора (агрегата компресорного)	Локомотив	Виготовлювач локомотива
1	2	3	4
КТ6	Поршневий	ТЕМ18ДМ	ЗАТ «Керуюча компанія «Брянський машинобудівний завод», м. Брянськ, РФ
		ТЕМ18	
		ОПЕ1АМ	
		ПЕ2В	ДП «Науково-виробничий комплекс «Електровозобудування», м. Дніпропетровськ, Україна
		ДЕ1	
ТЕП60	ВАТ «Коломенський завод», м. Коломна, Московська обл., РФ		
КТ6ЕЛ	Поршневий	ВЛ10	ТОВ «ПК «Новочеркаський електровозобудівний завод», м. Новочеркаськ, Ростовська обл., РФ
		ВЛ60	
		ВЛ80	
		ВЛ85	
		ВЛ86Ф	
		ВЛ8	АТ «Електровозобудівник», м. Тбілісі, Грузія
		ВЛ10	
		ВЛ11	
ВЛ15			
КТ7	Поршневий	2ТЕ116	ВАТ «ХК «Луганськтепловоз», м. Луганськ, Україна
		2ТЕ10	
		М62	
		ТЕ114	
		2ТЕ121	ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод», м. Людиново, Калузька обл., РФ
ТГМ6			

Продовження таблиці 5.17

1	2	3	4
ПК-3.5	Поршневий	ВЛ11М6	АТ «Електровозобудівник», м. Тбілісі, Грузія
		ТГМ4	ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод», м. Людиново, Калузька обл., РФ
		ЗЕС5ДО	ТОВ «ПК «Новочеркаський електровозобудівний завод», м. Новочеркаськ, Ростовська обл., РФ
		ДС3	ДП «Науково-виробничий комплекс «Електровозобудування», м. Дніпропетровськ, Україна
ПК-5.25	Поршневий	ТГМ7А	ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод», м. Людиново, Калузька обл., РФ
		ТЕМ7	
		ТЕП70БС	ВАТ «Коломенський завод», м. Коломна, Московська обл., РФ
ВВ-3.5/10	Гвинтовий	2ЕС6	ТОВ «Уральські локомотиви», м. Верхня Пишма, Свердловська обл., РФ
		2ЕС10	
		ЗЕС5ДО	ТОВ «ПК «Новочеркаський електровозобудівний завод», м. Новочеркаськ, Ростовська обл., РФ
		ТГМ4	ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод», м. Людиново, Калузька обл., РФ (модернізований ТОВ «Сисертське локомотивне депо», м. Сисерт, Свердловська обл., РФ)

Виробництво гвинтових компресорів неминуче вимагає високого технологічного рівня підприємства, що виготовляє компресори, великого обсягу стендових і експлуатаційних випробувань, високої кваліфікації як інженерного персоналу, так і робітників, зокрема застосування принципово нових рішень як у підвищенні надійності застосовуваної техніки, так і зниженні витрат на її обслуговування.

5.8.2. Компресори для гальмових систем рухомого складу залізничного транспорту

Підприємств, що входять до складу концерну «НІКМАС» (АТ «ПТМЗ», м. Полтава, АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш», м. Суми), накопичили величезний досвід у проектуванні й виготовленні гальмового компресорного устаткування.

Відразу після переходу з паровозної на тепловозну та електричну тягу і відповідно із застосуванням нового принципу гальмування з 40-х років ХХ століття АТ «ПТМЗ» розпочало виготовлення гальмових компресорів для тепловозів і електровозів. Першими в типових рядах гальмових компресорів для постачання стисненим повітрям пневматичної гальмової системи локомотива були два компресори – Е500 і КТ6.

Компресор Е500 – поршневий, із повітряним охолодженням, двоступінчастий, з горизонтальним рядним розміщенням циліндрів (рис. 5.58). Його встановлювали на електровозах серій ВА22М, ВА22, ВА23, ВА19М, ВА19. Приводом компресора були електродвигуни типів ДК-404А, ДК-402А, НБ-404, ЕК-Г2 або АС-81-6. Обертання колінчатого вала здійснювалося через знижувальний

редуктор, що перебуває в корпусі компресора. Компресор Е-500 мав корпус, відлитий в одному блоці з циліндром (0–150 мм) високого і низького (0–245 мм) тиску, у які запресовані чавунні втулки. Порівняно невелика частота обертання колінчатого вала обумовила більші діаметри поршневої групи і, як наслідок, значні габаритні розміри і питому масу. Деякі зразки компресора Е500 експлуатуються до цього часу. Однак цей компресор морально застарів і його виробництво давно припинене.

Весь ряд компресорів побудований на єдиній базі (рис. 5.59). Відмінною рисою типів є напрямок обертання (КТ6 і КТ6Ел – правого, а КТ7 – лівого стосовно привода компресора) і наявністю розвантажувального пристрою в компресорах КТ6 і КТ7, за допомогою якого вони переводяться на холостий хід віджиманням пластин клапанів.

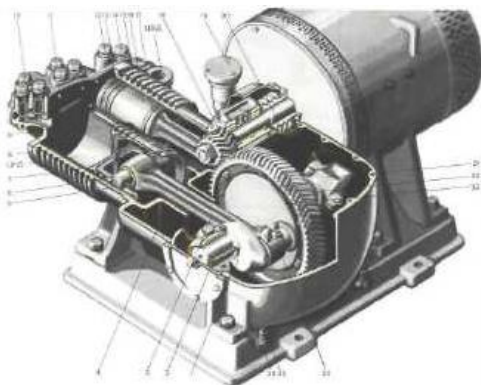


Рисунок 5.58 – Компресор Е500 Рисунок 5.59 – Компресор КТ6Ел

Технічне вдосконалювання залізничного транспорту, зокрема локомотивів, вимагало нових рішень у створенні компресорів для рухомого складу. Для цього АТ «ПТМЗ» освоїв серійне виробництво уніфікованих поршневих компресорів типу ПК. Компресори ПК-1,75А, ПК-3,5А, ПК-5,25А – двоступінчасті поршневі з V-подібним розміщенням циліндрів і повітряним охолодженням (рис. 5.60).



Рисунок 5.60 – Поршневі компресори серії ПК

На відміну від компресорів КТ компресори ПК високооборотні, що дозволило за менших габаритів і питомої маси одержати необхідну продуктивність при меншій споживаній потужності. Це було істотним досягненням у роз-

витку ряду поршневих компресорів для рухомого складу залізничного транспорту.

Крім того, сучасні тенденції розвитку залізничного транспорту, що передбачають істотне підвищення швидкості руху, збільшення продуктивності при формуванні вантажних потягів, розширення мережі електрифікованих доріг, неодмінне підвищення безпеки, вимог до наявності механічних частинок, масла, вологи в стисненому повітрі вимагають освоєння нової техніки в залізничних компресорах.

Новим підвищеним вимогам до залізничних локомотивів відповідають гвинтові компресори, активно впроваджувані в рухомому складі залізничного транспорту. На відміну від поршневого компресора, гвинтовий компресор входить до складу автономного агрегата із системою окремих вузлів, що дозволяють одержати на виході стиснене повітря високої якості, яке не містить механічних домішок, масла, води та їх парів.



Рисунок 5.61 – Компресорний агрегат ВВ-3,5/10

Станом на липень 2014 виготовлено більше ніж 550 одиниць гальмових гвинтових компресорних установок ВВ-3,5/10 (рис. 5.61), які успішно експлуатуються на електровозах 2ЕС6 і 2ЕС10, електровозі 3ЕС5К, тепловозах ЧМЕЗМ, модернізованих компанією «ZOS Zvolen» (Словаччина) разом із ТОВ «Тепловозоремонтний завод» (Полтава) та ін.

Освоєння гальмових гвинтових компресорів типу ВВ почалося з виробництва компресорного агрегата ВВ-3,5/10. Перший агрегат ВВ-3,5/10 (рис. 5.62) був установлений на дослідний електровоз 2ЕС6 (рис. 5.63), розроблений на ВАТ «Уральський завод залізничного машинобудування» (м. Верхня Пишма, Свердловська, обл., РФ) у 2007 р. Агрегат має мікропроцесорну систему керування та контролю всіх параметрів.

Одночасно для проходження експлуатаційних випробувань три компресорних агрегати ВВ-3,5/10 установлені на електровоз 3ЕС5К (рис. 5.64) виробництва ТОВ «ПК «НЕВЗ». Агрегат, що має дві рами, доставляється для роботи в повній заводській готовності. Всі основні вузли агрегата змонтовані на рамі з віброопорами, що знижують рівень вібрації основної рами, на якій жорстко змонтований блок очищення і осушування стисненого повітря. Привід компресора здійснюється від асинхронного електричного двигуна виконання ІМ2081. Один кінець вала двигуна через пружну муфту з'єднується з компресором, інший – із крильчаткою вентилятора, що охолоджує масло в теплообміннику. Вся інформація про роботу агрегата виводиться на семисегментний шестидекадний цифровий дисплей мікропроцесорного блока системи автоматики.



Рисунок 5.62 – Компресорний агрегат ВВ-3,5/10 для електровоза



Рисунок 5.63 – Магістральний вантажний електровоз постійного струму 2ЕС6

Технічні характеристики компресорного агрегата ВВ-3,5/10 наведені в табл. 5.18.

Таблиця 5.18 – Технічні характеристики компресорного агрегата ВВ-3.5/10

Назва параметра	Одиниця вимірювання	Значення
Об'ємна продуктивність, зведена до початкових умов	м ³ /хв	3,5 ± ± (-0,35)
Тиск стисненого повітря, кінцевий, надлишковий	МПа	0,98
Витрата масла на винесення, не більше ніж	мг/м ³	5
Потужність, споживана гвинтовим блоком, не більше ніж	кВт	25
Система автоматики	мікропроцесорна	
Ресурс до капітального ремонту	година	40 000

На основі аналізу багаторічного досвіду експлуатації компресорної техніки рухомого складу і результатів випробувань гвинтових гальмових агрегатів на нових локомотивах фахівці концерну «НІКМАС» у 2009–2010 рр. удосконалили агрегат ВВ-3,5/10 (рис. 5.65), змінивши компонування і потужність привода для підвищення його ергономічності та ремонтпридатності. У роботі був використаний багаторічний досвід виготовлення підприємством концерну АТ «НВАТ «ВНДКомпресормаш» пересувних гвинтових компресорних установок різного призначення. Дослідний зразок був виготовлений і випробуваний у квітні 2010 р.



Рисунок 5.64 – Магістральний вантажний електровоз змінного струму ЗЕС5ДО 2ЕС6-001



Рисунок 5.65 – Модернізований компресорний агрегат ВВ-3,5/10

У листопаді 2010 р. компресорні агрегати ВВ-3,5/10 встановлені на новий електровоз із асинхронним тяговим приводом 2ЕС10. Локомотив був розроблений і виготовлений ТОВ «Уральські локомотиви» і концерном Siemens AG (Німеччина). На сьогодні аналогів цього електровоза немає (рис. 5.66). Станом на початок 2011 р. компресорні агрегати ВВ-3,5/10 успішно експлуатуються на 12 електровозах.

У 2011 р. здійснювалась установка компресорного агрегата ВВ-3,5/10 на маневровий тепловоз ТГМ4 виробництва ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод», модернізований на ТОВ «Сисертське локомотивне депо» (м. Сисерт, Свердловська обл., РФ), що буде експлуатуватися на промислових підприємствах Свердловської області.

На початку 2011 року «Укрзалізниця» уклала договір на модернізацію маневрових тепловозів ЧМЕ-3 (рис. 5.67) із чеською компанією CZ LOCO. У період з 2011 по 2015 рр. чеські фахівці планували модернізувати 100 таких локомотивів, що експлуатуються на залізницях України. Наприкінці лютого 2011 року CZ LOCO погодило застосування компресорних агрегатів ВВ-3,5/10 виробництва концерну «НІКМАС» на тепловозах ЧМЕ-3 за планом їх модернізації.



Рисунок 5.66 – Магістральний вантажний електровоз постійного струму 2ЕС10



Рисунок 5.67 – Маневровий тепловоз ЧМЕ-3

У 2011–2013 рр. АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» та «ПТМЗ» розширили номенклатурний ряд гвинтових компресорних агрегатів ряду АКВ для гальмових систем рухомого складу. Перспективний ряд поданий у табл. 5.19.

Таблиця 5.19 – Перспективні гвинтові компресорні агрегати для гальмових систем, рухомого складу

Назва параметра	Од. вим.	Компресорний агрегат			
		АКВ-0.65/9	АКВ-1/1	АКВ-4.5/1	АКВ-6.1
Об'ємна продуктивність, зведена до початкових умов	м ³ /хв	0,7	1,0	4,5	6,0
Тиск стисненого повітря, кінцевий, надлишковий	МПа	0,9	1,0		

Таким чином, на АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» концерну «НІКМАС» сформувалася ефективна й енергійна згуртована команда конструкторів, техно-

логів, виробників, економістів, комерсантів, яка спрямована на розширення ринку поставки гальмових компресорів (рис. 5.68). Підприємство тісно співпрацює з компаніями-виробниками локомотивів світового рівня: «Skoda Transportation» і «CZ LOKO» (Чехія), ПАТ «ХК «Луганськтепловоз» (Україна), ВАТ «Людиновський тепловозобудівний завод» і ЗАТ «КК «Брянський машинобудівний завод» (Росія), АТ «Електровозобудівельник» (Грузія) та ін. Активно ведуться роботи із сертифікації. У серпні 2014 року АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» одним з перших в Україні одержав сертифікат відповідності Міжнародному стандарту залізничної промисловості IRIS, що визнаний у всій Європі.



Рисунок 5.68 – Дільниця складання гвинтових гальмових компресорних агрегатів на АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш»

З огляду на ряд незаперечних переваг щодо поршневих компресорних агрегатів і вимог, що підвищуються, до надійності, ремонтпридатності, безвідмовності, ергономічності, гвинтові компресорні агрегати є найбільш оптимальними для пневматичних систем рухомого складу. В умовах безперервного розвитку вітчизняного локомотивобудування впровадження гвинтових компресорів для гальмових систем стає актуальним і перспективним.

РОЗДІЛ 6

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПРЕСОРНОГО УСТАТКУВАННЯ НОВОГО ПОКОЛІННЯ

6.1. Комплексне вирішення проблем безпеки під час розроблення вуглеводневих родовищ із застосуванням компресорного устаткування

Підвищення безпеки ведення робіт є актуальною науково-прикладною проблемою, що стоїть перед розробниками нового компресорного устаткування і технологій його застосування під час розроблення родовищ природних вуглеводнів. Фахівці концерну «НІКМАС» упродовж ряду років проводять фундаментальні дослідження, спрямовані на вдосконалювання конструкцій та розроблення нового компресорного обладнання, що застосовується в технологіях видобутку вугілля, метану, нафти і газу.

Одним із найбільш успішних технічних рішень для підвищення безпеки ведення гірничих робіт у шахтах є застосування азотних установок. Азотні установки, розроблені концерном «НІКМАС», використовують:

- при ізоляції пожежних ділянок, а також при ізоляції в сполученні з різними способами прискорення процесу охолодження вогнища пожежі (рециркуляція, періодична зміна напрямку руху пожежних газів і т. п.), для попередження вибухів і припинення горіння;

- під час ліквідації пожеж у горизонтальних тупикових виробках будь-якої довжини, у випадку подачі азоту в тупикову частину по трубопроводу (можливий варіант подачі азоту через вентилятори місцевого провітрювання і вентиляційні трубопроводи);

- при веденні підривних робіт у гірничих виробках для створення інертного середовища в місці здійснення вибуху;

- для попередження ендогенних пожеж у скупченнях вугілля, які утворилися в результаті раптових викидів або з інших причин.

Вивчивши світову практику одержання інертних газових середовищ, технічні рішення, які застосовують провідні розроблювачі аналогічного устаткування, фахівці концерну «НІКМАС» розробили проект азотної мембранної гвинтової пересувної станції АМГП-15/0,7СУ1.

Перевагами мембранних газорозподільних установок є низькі початкові капіталовкладення, низька вартість обслуговування, невеликі енерговитрати у процесі експлуатації, простота в обслуговуванні, надійність, автоматизація, гнучкість у виборі режимів роботи, можливість відстеження основних робочих параметрів станції із центрального комп'ютера через Інтернет. Основною перевагою застосування азотної станції є відсутність необхідності прив'язування до джерел якого-небудь вогнегасильного засобу, мобільність і висока маневреність. Азотна станція насамперед розрахована на застосування в умовах утрудненого доступу до вогнища пожежі. Це є гарантією того, що під час гасіння пожежі буде забезпечена безперервна подача інертного середовища.

Азотними станціями АМГП-15/0,7СУ1 укомплектовано більшість гірничорятувальних загонів України. Вони успішно використовуються при пожежогашіннях на шахтах України. У воєнізованих гірничорятувальних загонах (1 ВГСО, м. Горлівка; й ВГСО, м. Макіївка; 4 ВГСО, м. Луганськ; 5 ВГСО, м. Красний Луч; 6 ВГСО, м. Торез; 7 ВГСО, м. Краснодон; 8 ВГСО, м. Павлоград; Львівсько-Волинському ВГСО, м. Червоноград; ОВГСО, м. Донецьк) упроваджені станції азотні мембранні гвинтові пересувні АМГП-15/0,7 У1 у кількості 9 станцій продуктивністю 15 м³/хв. Станції експлуатуються з 2004 року. Станції АМГП-15/0,7 У1 застосовані для гасіння пожеж на шахтах ОП «Шахта ім. М. І. Калініна» ДП «ДУЕК», ПАТ «Шахта ім. О. Ф. Засядька», шахта ім. Ф. Е. Держинського ДП «Ровенькиантрацит», ВК «Краснолиманська». Усього станціями вироблено 12 625 325,00 м³ азоту. Загальне напрацювання становить 12 536 годин. Фактичний економічний ефект, одержаний за 10 років експлуатації 9 станцій АМГП-15/0,7У1, лише за рахунок збереження устаткування і ліквідації втрат у видобутку вугілля, що спричинені аваріями, становив близько 2 млрд грн, при цьому було збережено понад 1 000 робочих місць.

Одним із перспективних напрямів діяльності концерну «НІКМАС» є розроблення і постачання устаткування, призначеного для утилізації і когенерації шахтного газу-метану. Добування метану за допомогою систем утилізації дозволяє вирішити не лише проблему безпеки шахтарів, а й знизити викиди парникових газів. Підприємства мали можливість продавати одержаний одиниці скорочення викидів на міжнародному ринку за рахунок реалізації Кіотського протоколу.

У 2008 році розроблено і зроблено поставки першої в Україні одиничної партія установок, призначеної для утилізації шахтного газу-метану, які застосовуються на деяких шахтах України. Установки забезпечують відкачування газу із шахти і його утилізацію через спалювання, а також подачу споживачеві для енергетичного застосування без використання традиційних рідинно-кільцевих вакуумних насосів ВВН.

Вибухозахищеність установки забезпечується такими конструктивними рішеннями: безперервним контролем вмісту метану в повітрі машинного відділення і шафи газоаналізатора (при реєстрації датчиками метану в кожному із цих приміщень з концентрацією 0,5 % включається аварійна сигналізація і примусова вентиляція приміщення, при концентрації метану 1 % відбувається аварійне відключення електроживлення всієї установки); безперервним контролем складу метано-повітряної суміші на вході в установку (пуск установки дозволений лише при вмісті метану з концентрацією 25 % і більше); використанням вибухобезпечного електроустаткування установки; застосуванням сертифікованих вогнеперегородок разом із датчиками температури.

Установка виконана для автоматичної безперервної експлуатації без постійного нагляду, пусковий процес повністю автоматизований. Проте за необхідності, конструкція установки дозволяє здійснювати запуск і вручну, ведеться контроль і запис усіх необхідних параметрів (температури, тиску, кількості утилізованого метану) для реалізації проекту утилізації в рамках Кіотського протоколу, установлена система віддаленого моніторингу.

Установка може працювати самостійно з електропостачанням від загальної енергомережі або від газової контейнерної теплоелектростанції. У цьому варіанті газ на контейнерну теплоелектростанцію подається від установки, а зайва кількість газу спалюється в самій установці (рис. 6.1). Залежно від багаторазовості дегазаційних свердловин відсмоктування газу може здійснюватися однією або декількома установками, що паралельно працюють. При цьому система керування вищого рівня буде автоматично регулювати роботу установок, відключаючи або включаючи кожну з них, залежно від витрати газу.

На шахтах «Молодогвардійська», «Самсонівська-Західна» ПАТ «Краснодонвугілля» впроваджені установки компресорні газоутилізаційні УКГ-5/8 продуктивністю 1 551 м³/ч. Установки експлуатуються з 2008 року. Усього за допомогою установок утилізовано 21 627 079,00 м³ газу метану. Загальне напруцювання становить 57 160 годин. Фактичний економічний ефект, одержаний за 6 років експлуатації 3 установок УКГ-5/8, за рахунок зниження емісії метану в атмосферу, реалізації положень Кіотського протоколу становив близько 20 млн грн.

Для підвищення безпеки процесу нафтовидобування та пневмовипробувань газопроводів широко використовується як робоче середовище інертний газ-азот. Інертне газове середовище (90–95 % азоту) одержують шляхом мембранного поділу атмосферного повітря. Після попереднього стискання та підготовки повітря в мембранному блоці розділяється на кисень і азот. Кисень видаляється в атмосферу, інертна суміш подається в свердловину або газопровід.



Рисунок 6.1 – Схема енергетичного використання установки УКГ-5/8

Для забезпечення потреб у стислому азоті призначені пересувні станції СДА розробки АТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш» концерну «НІКМАС», що відрізняються наявністю розділового мембранного блока. Азот, вироблений компресорним устаткуванням, у нафтогазовій промисловості застосовують як контрольовану нейтральну атмосферу для підтримки внутрішньопластового тиску і збільшення видобутку продукту. Азотні мембранні станції й установки широко використовуються в складі установок компримування та підготовки вуглеводнів, систем перекачування СУГ, електростанцій з водневим охолодженням генераторів потужністю понад 200 МВт.

Гостра актуальність проблеми поточного стану енергоресурсів в Україні обумовила визначення шляхів підвищення інтенсифікації пластового тиску з використанням сучасних вторинних технологій активного впливу на пласт. Зокрема, на Котелевському газоконденсатному родовищі реалізується проект із використання газоподібного азоту, одержаного з атмосферного повітря безпосередньо на місці його застосування. У результаті виготовлено компресорну станцію блоково-модульного виконання для цілодобового виробництва 50 000 м³/добу газоподібного азоту для сайклінг-процесу.

Цей комплекс устаткування забезпечує одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту концентрацією не менше ніж 99 % із його подальшим накачуванням у свердловину газоконденсатного родовища під тиском до 250 бар. Моніторинг та керування за роботою усього устаткування відбувається з єдиного відділеного пульта через систему вищого рівня з мінімальною присутністю персоналу.

Застосування нового компресорного устаткування: станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП у процесах видобування вугілля для запобігання і гасіння підземних пожеж, установок компресорних газоутилізаційних УКГ для утилізації шахтного метану і запобігання його вибухів, азотних компресорних станцій при бурінні, освоєнні, інтенсифікації, ремонті газових і нафтових свердловин, розкритті продуктивних газонафтоносних пластів дозволяє в комплексі вирішувати проблему безпеки під час розроблення родовищ вуглеводнів.

Важливим рішенням щодо підвищення безпеки розроблення родовищ вуглеводнів є широке використання розроблених смарт-систем керування та візуального контролю параметрів під час застосування компресорних установок.

1. Смарт-системи керування, візуального контролю параметрів, захисних блокувань, захисного відключення локальних компресорних установок на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric, ComAp, Allen-Bradley та ін. (рис. 6.2).

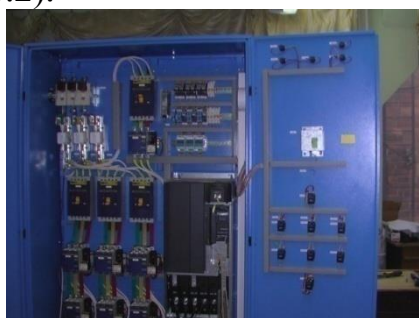


Рисунок 6.2 – Система керування локальних компресорних установок

2. Смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens установками компресорними газоутилізаційними УКГ-5/8 для утилізації метану шляхом спалювання його в спеціальній камері та запобігання виділенню в атмосферу шкідливого парникового газу-метану (CH₄) (рис. 6.3).

3. Смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric станціями типу СГВ, які призначені для компримування при-

родного газу і безперебійного забезпечення паливним газом промислових газових турбін, а також для використання як дотискний компресор у галузях, де потрібен стислий газ із заданими параметрами (рис. 6.4).



Рисунок 6.3 – Система керування установками компресорними газопідготувальними УКГ-5/8

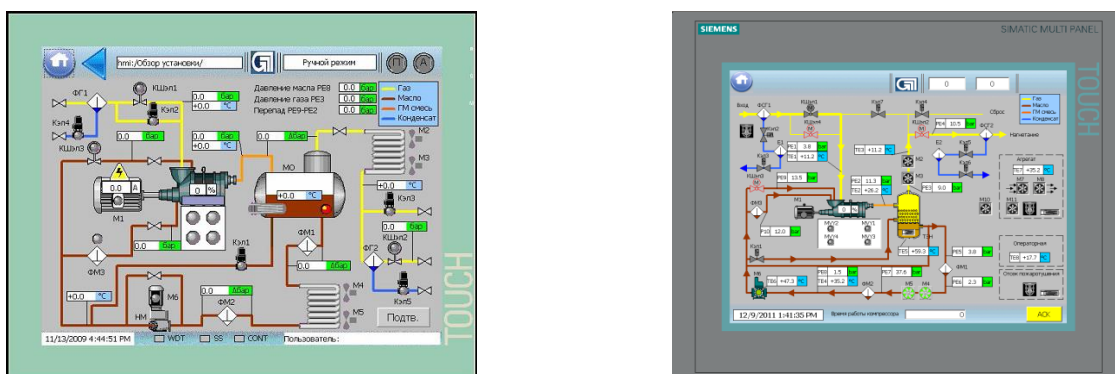


Рисунок 6.4 – Система керування компресорними станціями типу СГВ

4. Смарт-системи керування на базі контролерів компаній ComAp, Allen-Bradley компресорними установками для стискання вуглеводнів (пар бензину) і скраплення їх у міжступеневих конденсатівідвідниках (рис. 6.5).



Рисунок 6.5 – Система керування компресорними установками для стискання вуглеводнів

5. Смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric станціями типу ААВН, які призначені для одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту концентрацією до 97 % та подальшої подачі його споживачеві.

6. Смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens компресорними установками для стиснення коксового газу та інших вибухонебезпечних середовищ (рис. 6.6).



Рисунок 6.6 – Система керування компресорними установками для стиснення коксового газу та інших вибухонебезпечних середовищ

7. Смарт-системи на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric, ComAp, Allen-Bradley та ін. обліку шахтного газу (об'ємна витрата, концентрація метану CH_4 , вуглекислого газу CO_2 , кисню O_2 та ін. середовищ) і контролю, сигналізації та керування технологічним устаткуванням шахт (рис. 6.7).

8. Смарт-системи віддаленого моніторингу і керування всією номенклатурою компресорної техніки, що випускається компанією, за допомогою модема-роутера і звичайної SIM-картки будь-якого оператора.

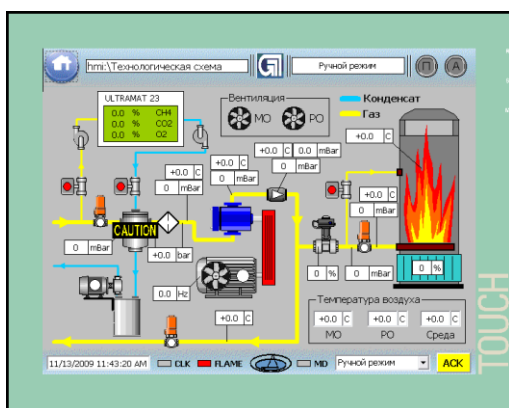


Рисунок 6.7 – Система керування контролю, сигналізації і керування технологічним устаткуванням шахт

Для оцінювання впливу на безпечність робіт виконане моделювання безаварійної роботи гірників при використанні смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем.

Проходження процесів видобування описується вектором вихідних параметрів (технічних, технологічних, гірничо-геологічних та ін.) технологічних процесів видобування X ; вектором параметрів, що характеризують індивіду-

альні особливості гірників L , які здійснюють керування комплексом машин і механізмів, компресорними установками, технологічними процесами видобування вугілля та метану. Відомі закономірності зміни показників ефективності процесів від параметрів множини X : $Y = f(X)$. Потрібно: розробити алгоритм моделювання функціонування системи «людина (гірник) – техніка (компресорні установки) – технологія видобування вугілля та метану» в умовах гірничодобувних підприємств, інтегрально оцінити вплив індивідуальних особливостей гірників на продуктивність і безпеку системи та встановити закономірності зміни показників ефективності системи від повноти, достовірності своєчасності інформації та індивідуальних параметрів гірників $Y = f(X, L)$ при використанні пристроїв одержання додаткової інформації – смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем.

Процес видобування можна подати як сукупність елементарних актів реакції гірника на різного роду подразнення (зорові, звукові, тактильні та ін.). Сукупність елементарних актів реакції людини на подразники супроводжується безперервним процесом приймання, перероблення інформації та прийняття гірником рішення, обумовленого поточною ситуацією. Таким чином, гірник є особою, яка приймає рішення.

Інформація надходить гірникові у вигляді сигналів: звукових, світлових та ін. Кількість інформації, яка може сприйняти людина, має певні обмеження, що залежать від його досвіду, індивідуальних особливостей, темпераменту, емоційного стану, типу нервової діяльності, мотивації дій та безлічі інших факторів. Обсяг вхідної та інформації, що перероблюється, насамперед залежить від кількості та складності керованих людиною об'єктів, темпів процесів видобування. Продуктивність процесу видобування значною мірою залежить від можливостей людини щодо використання одержаної нею інформації та визначається обсягом її пам'яті, темпом приймання інформації, швидкістю її запам'ятовування і винайдення в пам'яті, тривалістю зберігання та ін.

Проведені дослідження показали, що в середньому час реакції людини (гірника) на візуальну інформацію на 5–10 % менший часу реакції на звукову інформацію. Так само відомо, що більше 75 % інформації людина сприймає візуально.

Інформація, у свою чергу, характеризується не лише обсягом (кількістю), а й якістю. Від якості інформації багато в чому залежить обґрунтованість та оптимальність прийняття рішення гірником у тій або іншій ситуації у процесі видобування. Якість інформації прийнято характеризувати такими властивостями: визначеністю, точністю, повнотою, чіткістю, своєчасністю, достовірністю, несуперечністю.

Від цих властивостей залежить рівень інформованості гірника про поточну ситуацію. Для оцінювання рівня інформованості робітника використовують інтегральний показник інформованості, що, у свою чергу, визначається приватними показниками інформованості, до основного з яких відносять: показник повноти інформованості – характеризує відповідність кількості одержуваної інформації, необхідної для прийняття рішення; показник своєчасності інформо-

ваності – визначає, наскільки ресурс часу гірника на формування і прийняття рішення відповідає ресурсу часу від моменту одержання інформації до моменту реалізації рішення; показник достовірності інформованості – характеризує відповідність одержаної гірником інформації дійсному стану ситуації.

Показник повноти інформованості визначається за формулою

$$I_{\Pi} = \frac{\Pi - \Pi^-}{\Pi^+ + \Pi^-}, \quad (6.1)$$

де Π^+ , Π^- – максимально доцільний і мінімально припустимий обсяг інформації, необхідний для прийняття рішення; Π – поточний обсяг інформації, одержаний гірником.

Показник своєчасності інформованості визначається за формулою

$$I_T = 1 - \frac{R_{fk} + R_{rk}}{2}, \quad (6.2)$$

де R_{fk} – часовий ресурс формування рішення:

$$R_{fk} = \frac{T_{fk} - T^-}{T^+ - T^-}; \quad (6.3)$$

R_{rk} – часовий ресурс реалізації рішення:

$$R_{rk} = \frac{T^+ - T_{rk}}{T^+ - T^-}, \quad (6.4)$$

де T_{fk} – тривалість періоду від моменту початку формування рішення t_{fn} (моменту одержання інформації t_0 , при $t_{fn} = t_0$) до моменту його закінчення t_{fk} ; T_{rk} – тривалість періоду від моменту початку формування рішення до моменту його реалізації; T^- , T^+ – відповідно мінімально і максимально можлива тривалість періоду формування рішення.

Показник рівня достовірності інформованості визначається за формулою

$$I_D = \frac{D - D^-}{D^+ - D^-}, \quad (6.5)$$

де D^+ , D^- – відповідно максимальний і мінімальний, практично доцільний рівень достовірності інформованості; D – поточна величина достовірності інформованості гірника.

Якісні показники інформованості I_{Π} , I_T і I_D змінюються в межах $[0,1]$ і визначаються шляхом нормування поточних значень Π , T_{fk} , T_{rk} і D щодо заданих (припустимих) інтервалів Π^+ , Π^- , T^- , T^+ , D^+ , D^- , їх зміни, кількісні значення яких доцільно визначати на підставі методу експертного оцінювання.

Показники рівня повноти, своєчасності і достовірності сукупно характеризують якість інформованості гірника про поточну ситуацію у процесі видобування. Загальний рівень інформованості прийнято оцінювати інтегральним показником інформованості I , що є мультиплікативною функцією приватних показників:

$$I = f(I_{\Pi})f(I_T)f(I_D). \quad (6.6)$$

Загальний рівень інформованості є нелінійною функцією кожного із приватних показників I_i і описується виразом

$$I = f(I_i) = \ln(1 + I_i). \quad (6.7)$$

Процеси видобування – це сукупність станів системи «людина – техніка – технологія», кожний з яких характеризується певним набором показників: параметрів зовнішніх впливів Y , внутрішніх параметрів системи X , керувальними параметрами U , параметрами впливу факторів ризику R . Якщо всі показники у процесі видобування перебувають в апіорі заданих інтервалах $Y \in Y^{\pm} \cap X \in X^{\pm} \cap U \in U^{\pm} \cap R \in R^{\pm}$, то такий режим є штатним. Якщо хоч один із показників не належить апіорі заданому інтервалу $Y \notin Y^{\pm} \cup X \notin X^{\pm} \cup U \notin U^{\pm} \cup R \notin R^{\pm}$, то процес переходить у позаштатний (критичний, надзвичайний, аварійний, катастрофічний) режим функціонування. Основними параметрами, що характеризують процес переходу (перехідний процес) зі штатного режиму в позаштатний, є параметри множини R – фактори ризику.

Фактори ризику характеризуються ступенем ризику η – імовірністю переходу процесу функціонування системи зі штатного режиму в позаштатний і рівнем ризику w – величиною збитку небажаного впливу параметрів множини R . У свою чергу, η – імовірність переходу процесу зі штатного в позаштатний режим під впливом факторів множини R залежить від зміни рівня інформованості гірника, обумовленого інтегральним показником інформованості I . Таким чином, ступінь ризику є функцією інформованості $\eta = f(I)$. Очевидно, що зі збільшенням рівня інформованості ймовірність переходу процесу в позаштатний режим знижується.

Залежність $\eta = f(I)$ є нелінійною, що обумовлює нерівномірність збільшення ступеня ризику зі збільшенням темпів кожного із приватних показників інформованості. Так, якщо інформація має певну повноту, своєчасність і достовірність, то навіть невелика її кількість істотна для процесу прийняття рішення. У процесі надходження і накопичення інформації її цінність поступово знижується. Таким чином, темпи (швидкість) збільшення цінності інформації спершу зростають, а в процесі її накопичення поступово стабілізуються. Процеси подібного роду щонайкраще описуються логарифмічною функцією. З огляду на вищевикладене залежність імовірності переходу процесу виїмки вугілля зі штатного в позаштатний режим від рівня інформованості гірника описується функцією

$$\eta = 1 - \ln(I), \quad (6.8)$$

або з урахуванням (6.6)

$$\eta = 1 - \ln(1 + I_{II} I_T I_D). \quad (6.9)$$

На практиці зручно користуватися відомою з теорії надійності величиною протилежною η – імовірністю безвідмовної роботи, що дорівнює

$$P = 1 - \eta = \ln(1 + I_{II} I_T I_D). \quad (6.10)$$

Величина P характеризує надійність функціонування системи «людина – техніка – технологія» залежно від рівня інформованості гірника, обумовленого

приватними показниками інформованості I_{II} , I_T , I_D . У свою чергу, показник своєчасності інформованості залежить від часових періодів прийняття і реалізації рішення.

Параметр T_{fk} – тривалість періоду від моменту одержання інформації до моменту закінчення формування рішення (час ухвалення рішення) – багато в чому визначається індивідуальними особливостями гірника. До таких необхідно віднести досвід, кваліфікацію, навички, темперамент, емоційний стан та ін. Ці психофізичні параметри визначають час прийняття рішення гірником.

Відома залежність часу латентного періоду реакції людини (часу від моменту появи сигналу до початку руху, часу прийняття і перероблення інформації) від його психофізичних особливостей. Час реакції людини на подразник можна визначити за формулою

$$t_* = T \ln \left(1 + \frac{\varphi}{\dot{R}T} \right), \quad (6.11)$$

де \dot{R} – темп надходження інформації в пам'ять (приймання інформації пам'яттю), од./с; φ – деяка кінцева кількість інформації, що зберігається в пам'яті після проходження досить великого проміжку часу, од.; T – часова стала перероблення інформації пам'яттю, с.

Збільшення кількості I пропонованої та засвоєної інформації еквівалентно збільшенню параметра φ . Вплив досвіду або кваліфікації (навички) людини визначається темпом сприйманою пам'яттю інформації \dot{R} , тому що при більшому досвіді пропонована інформація засвоюється з більшим темпом. Має місце залежність збільшення часу прийняття людиною рішення зі збільшенням кількості пропонованої інформації та зменшення часу ухвалення рішення з підвищенням її досвіду й рівня кваліфікації. Часову сталу T варто розглядати як вплив емоційного стану, темпераменту особистості, індивідуальних психофізіологічних особливостей гірника на процес прийняття – перероблення інформації та ухвалення рішення.

З огляду на вищевикладене тривалість T_{fk} періоду від моменту початку формування рішення (моменту одержання інформації) до моменту його закінчення еквівалентно часу латентного періоду реакції ($T_{fk} \equiv t_*$) і визначається виразом (6.11).

З урахуванням (6.11) формула для визначення ресурсу часу на формування рішення набуває такого вигляду:

$$R_{fk} = \frac{T \ln \left(1 + \frac{I}{\dot{R}T} \right) - T^-}{T^+ - T^-}. \quad (6.12)$$

Таким чином, імовірність безвідмовної роботи системи «людина – техніка – технологія» з урахуванням психофізичних параметрів, якісних і кількісних характеристик інформованості гірників задається виразами (6.1–6.12).

Стосовно бригади гірників імовірність безвідмовної роботи системи в припущенні незалежності відмови системи від дій кожного з робітників дорівнює добутку ймовірностей їх безвідмовної роботи:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i = \prod_{i=1}^n \ln(1 + I_{\Pi} I_T I_D), \quad (6.13)$$

де n – число гірників комплексної бригади, що здійснюють видобування.

За однакової імовірності безвідмовної роботи кожного з робітників, припускаючи, що дані події утворюють повну групу, формула (6.13) набуває вигляду:

$$P = \ln(1 + I_{\Pi} I_T I_D)^n. \quad (6.14)$$

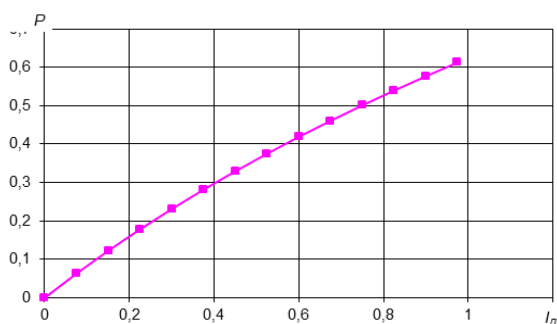
Так, наприклад, для вугільних шахт, розглядаючи (6.14) як інтегральний показник надійності (працездатності) функціонування системи «людина – техніка – технологія» упродовж добувної зміни, продуктивність виїмкового комбайна (рівень видобутку вибою) буде визначатися виразом

$$q = mb\gamma v_n P = mb\gamma v_n \ln(1 + I_{\Pi} I_T I_D)^n, \quad (6.15)$$

де m – потужність пласта, що виймається, м; b – ширина захвату виїмкового комбайна, м; v_n – швидкість подачі виїмкового комбайна, м/хв; γ – об'ємна щільність вугілля, т/м³.

Установлено закономірності зміни безпеки (імовірності переходу процесу в позаштатний режим) від психофізичних параметрів гірника, якісних характеристик інформації та її кількості (рис. 6.8). Показано, що рівень безпеки системи зменшується в логарифмічній залежності зі збільшенням кількості інформації, яка надходить гірникові, збільшується в логарифмічній залежності від параметра, що характеризує навички, досвід, кваліфікацію гірника і лінійно зростає зі збільшенням ресурсу часу реалізації рішення та показника рівня повноти і достовірності інформованості. Установлено лінійну залежність збільшення безпеки при одержанні додаткової інформації при використанні смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем. Водночас збільшення загальної кількості інформації підвищує ймовірність виникнення аварійної ситуації та знижує продуктивність системи, тому обробляти таку інформацію повинен досвідчений гірник, який має певні навичками та кваліфікацію. Пріоритетним є вдосконалювання системи керування безпекою з використанням пристроїв одержання додаткової інформації при використанні смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем, що підвищить рівень повноти і достовірності інформованості та забезпечить своєчасне прийняття правильного рішення.

а)



б)

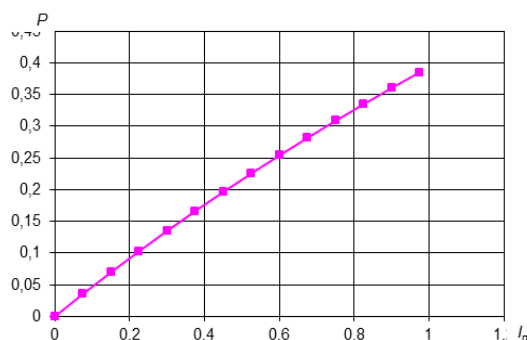


Рисунок 6.8 – Залежності рівня безпеки (імовірності переходу процесу в позаштатний режим) від показника достовірності (а) та повноти (б) інформованості

Для аналізу ефективності застосування смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем на шахтах як елемент системи керування процесом видобутку побудована функціональна схема системи керування «бригадир (диспетчер) – смарт-системи керування і візуального контролю – гірники», подана на рис. 6.9.

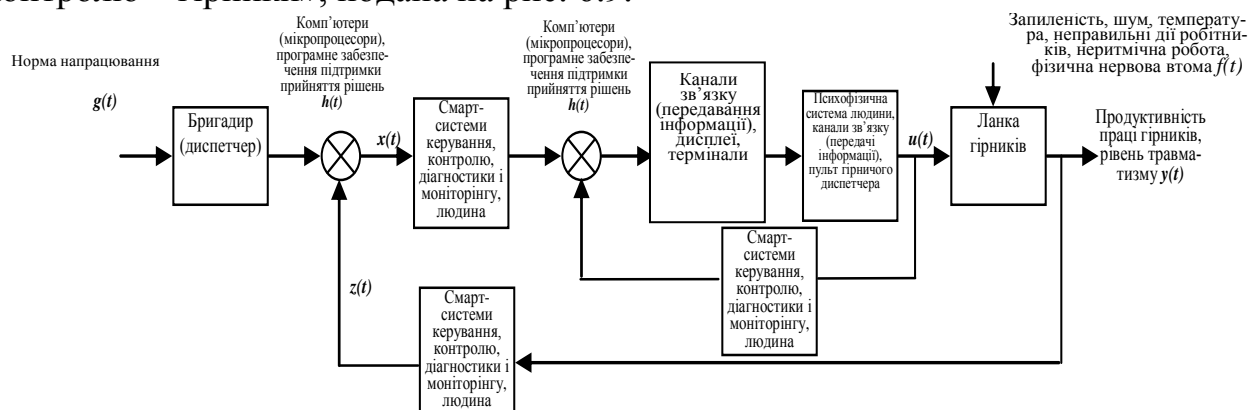


Рисунок 6.9 – Функціональна схема системи керування «бригадир (диспетчер) – смарт-системи керування і візуального контролю – гірники»

Ланками «системи контролю, діагностики і моніторингу» і «канали зв'язку (передавання інформації), дисплеї, термінали» у цьому випадку є розроблені смарт-системи керування і візуального контролю на шахтах при використанні компресорних систем.

Передавальна функція системи «бригадир (диспетчер) – гірники – смарт-системи керування і візуального контролю» визначається як функція замкненої системи з негативним зворотним зв'язком (сигнал на виході ланки контуру зворотного зв'язку віднімається із сигналу на вході ланки бригадира (диспетчера):

$$W_{BP-ГРОВ} = \frac{W_{ГР} W_{БР} W_{КС}}{1 - W_{ГР} W_{БР} W_{КЗ} W_{СК}}, \quad (6.16)$$

де $W_{ГР}$, $W_{БР}$, $W_{КЗ}$, $W_{СК}$ – передавальні функції відповідно ланки гірників, бригадира (диспетчера), каналів зв'язку (передавання інформації від бригадира (диспетчера) до ланки гірників) і системи контролю, діагностики і моніторингу (смарт-системи керування і візуального контролю).

Визначимо передавальні функції окремих динамічних елементів-ланок системи керування процесом видобування в шахтах.

Через складність опису і прийняття єдиної моделі людини для різних умов її діяльності (необхідність урахування процесів адаптації людини, обмеженість смуги пропускання, одноканальність, недостатня точність роботи, нестабільність коефіцієнта підсилення, внесення перешкод, істотно нелінійна поведінка в екстремальних умовах і т. п.) на практиці найчастіше використовують спрощені моделі. Так, людина може бути представлена у вигляді лінійної моделі, що складається з трьох послідовно з'єднаних ланок: підсилювальної ланки із запізнюванням, що приймає сигнали, інформацію (передавальна функція $W_1 = k_1 e^{T_1 p}$), підсилювальної, здійснюваної формування і прийняття рішень при достатньому тренуванні, відсутності впливів, що обурюють, і мінімального

психофізіологічного напруження людини (передавальна функція $W_2 = k_2$), й інерційної, відповідальної за виконання людиною прийнятого рішення (передавальна функція $W_3 = k_3/(T_2p+1)$). Передавальна функція людини в цьому випадку має вигляд

$$W(p) = W_1W_2W_3 = k_1e^{T_1p} \cdot k_2 \cdot \frac{k_3}{T_2p+1}, \quad (6.17)$$

де $k = k_1k_2k_3$ – коефіцієнт підсилення людини; T_1 – час реакції людини; T_2 – часова стала, що характеризує інерцію в утворенні виконавчої дії (психофізичний параметр). Параметри можна взяти такими: $T_1 = 0,2$ с, T_2 – приблизно 0,125 с.

Із набуттям досвіду гірник при прийнятті рішення і формуванні виконавчої дії (переміщенні рукояток, важелів, гідродомкратів, натисканні кнопок на пульті керування та ін.) ураховує не лише величину, а й швидкість зміни помилки. У моделі (6.17) замість пропорційної ланки додається ланка, що диференціює і має передавальну функцію:

$$W_2 = k_2p. \quad (6.18)$$

При фізичних навантаженнях, що мають місце, характерних для всіх гірників, додається четверта ланка – інерційна першого порядку, що характеризує нервово-мускульну систему людини (передавальна функція ($W_4 = k_4/(T_3p+1)$)). Ланки, що характеризують інерцію у виконанні рішення, можна розглядати як єдину аперіодичну ланку другого порядку з передавальною функцією

$$W_3 = \frac{k_3k_4}{(T_2p+1)(T_3p+1)}, \quad (6.19)$$

де T_3 – часова стала, що характеризує інерцію в утворенні виконавчої дії (біомеханічний параметр). Згідно з експериментальними дослідженнями параметр T_3 має нижню межу приблизно 0,1 с.

Таким чином, передавальна функція гірників буде визначатися виразом (6.17) з урахуванням виразу (6.19), найбільш досвідченого гірника – виразом (6.17) з урахуванням (6.18) і (6.19).

Якщо людина є висококваліфікованим працівником-інтелектуалом, то вона враховує як відхилення регульованої величини, так й інтеграл, швидкість і прискорення її зміни, тобто виконує функцію пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора, а її передавальна функція має вигляд

$$W(p) = k \left(1 + \frac{1}{T_1p} + T_2p \right), \quad (6.20)$$

де k – коефіцієнт передачі; T_1 , T_2 – часові сталі відповідно інтегрування (ступінь уведення інтеграла в закон регулювання – час ізодрома) і диференціювання (час попередження регулятора).

Також у вигляді пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора доцільне подання системи приймання, оброблення інформації та підтримки прийняття рішень.

Людина, яка інтегрально оцінює параметри системи керування, може бути представлена у вигляді пропорційно-інтегрального регулятора з передавальною функцією, обумовлену виразом

$$W(p) = k \left(1 + \frac{1}{T_i p} \right). \quad (6.21)$$

Передавальна функція бригадира-диспетчера як висококваліфікованого досвідченого оператора-інтелектуала буде визначатися виразом (6.20), керуючого персоналом шахти (начальника зміни, головного інженера і директора) – виразом (6.21).

Канали зв'язку можна подати у вигляді ланки із запізнюванням із передавальною функцією

$$W(p) = e^{-Tp}, \quad (6.22)$$

де T – час запізнювання.

Таким чином, передавальна функція каналів зв'язку, передачі інформації між підсистемами й усередині них буде визначатися виразом (6.22).

До пристроїв, що мають інерційні властивості, можна віднести важелі, гідродомкрати, стояки, верхняки, перекриття кріплення. Передавальна функція таких ланок буде визначатися виразом

$$W(p) = \frac{k}{1 + Tp}. \quad (6.23)$$

До ланок, для яких вихідна величина в будь-який момент часу пропорційна вхідній (безінерційній), необхідно віднести датчики, системи контролю, діагностики, смарт-системи керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем, блоки і пульти керування, механізми передачі, шестерні, виконавчі органи машин, а також гірничий масив як елементи технології видобування. Передавальна функція для таких ланок буде визначатися виразом

$$W(p) = k, \quad (6.24)$$

де k – коефіцієнт передачі ланки.

Таким чином, передавальна функція системи керування процесом видобування задається виразом (6.16) з урахуванням передавальних функцій окремих динамічних ланок (6.17)–(6.24). Алгоритм моделювання і дослідження якості функціонування системи керування процесом видобування із застосуванням смарт-систем керування та візуального контролю компресорних систем на шахтах полягає в послідовному визначенні показників швидкодії, точності та стійкості системи «бригадир (диспетчер) – гірники – смарт-системи керування і візуального контролю компресорних систем» при різного роду вхідних сигналах, що обурюють, і при варіюванні параметрів системи.

Проведено моделювання системи керування процесом видобування за викладеним алгоритмом: без включення в передавальну функцію ланки, що моделює смарт-системи керування і візуального контролю (6.24), і моделюванням бригадира (диспетчера) у вигляді пропорційно-інтегрального регулятора (6.23), з включенням функції (6.24), поданням бригадира (диспетчера) у вигляді пропорційно-інтегрального регулятора (6.21), а системи приймання, оброблення

інформації й підтримки прийняття рішень у вигляді пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (6.22).

Аналіз перехідної функції при реагуванні системи на одиничний вплив – одиничний стрибок, що імітує миттєву зміну обстановки у процесі видобування, без використання смарт-системи керування і візуального контролю і з її застосуванням показав, що у першому випадку процес коливальний, нестійкий, у другому – процес має сталий характер, тобто система адекватно реагує на зміну ситуації за рахунок використання смарт-систем керування і візуального контролю. Відповідно підвищується стійкість, швидкодія і точність роботи такої системи за умов її функціонування, що змінюються, а отже, підвищується безпека керування.

6.2. Економічна ефективність упровадження установок компресорних газоутилізаційних УКГ-5/8

Дані про показники впровадження установок компресорних газоутилізаційних УКГ-5/8 наведені в табл. 6.1 станом на травень 2014 року.

Таблиця 6.1 – Показники впровадження установок УКГ-5/8

Підприємство	Заводський номер	Дата введення в експлуатацію	Працювання, годин	Утилізовано метану, млн м ³	На даний час
Шахта «Молодогвардійська» ПАТ «Краснодонвугілля»	005	08.08.2013	3630	1175 501	В експлуатації
Шахта «Молодогвардійська» ПАТ «Краснодонвугілля»	01-07	01.08.2008	30608	11 008 912	В експлуатації
Шахта Самсонівська-Західна	02-07	10.04.2009	22922	9442 666	В експлуатації

Вартість 1 установки УКГ-5/8 (C_y) – 5 млн грн.

Кількість придбаних установок (Q_y) – 3 шт.

Витрати на придбання 3 установок становлять

$$Z_n = C_y \cdot Q_y = 5 \cdot 3 = 15 \text{ млн грн.}$$

Питома вартість експлуатації й обслуговування 1 установки УКГ-5/8 (C_e) – 100 грн/годину.

Загальне напрацювання становить T_n – 57 160 годин.

Витрати на експлуатацію й обслуговування

$$Z_e = C_e \cdot Q_{cm} \cdot T_n = 100 \cdot 3 \cdot 57\,160 = 17\,148\,000 \text{ грн.}$$

Кількість утилізованого газу $Q_2 = 21\,627\,079,00 \text{ м}^3$.

Еквівалент у переведенні на 1 т вуглекислого газу $Z_{2 \text{ екв}}$ становить 454 893,57 т.

Ставка за 1 т $Z_{2 \text{ екв}}$ при зменшенні викидів метану в атмосферу відповідно до статті 6 Кіотського протоколу становить $C_{co2} = 114,5$ грн.

Потенційні надходження виплат за квотами зменшення викидів метану в атмосферу під час роботи газоутилізаційних установок становлять

$$П = C_{co2} \text{ і } Z_{2\text{ екв}} = 114,5 \text{ грн/т і } 454\,893,57 \text{ т} = 52\,085\,314 \text{ грн.}$$

Економічний ефект E_e за рахунок зниження емісії метану в атмосферу становить

$$E_e = П - Z_n - Z_e = 52\,085\,314 - 15\,000\,000 - 17\,148\,000 = 19\,937\,314 \text{ грн.}$$

6.3. Економічна ефективність станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП-15/0,7 У1

Показники з упровадження станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП-15/0,7 У1 наведені в табл. 6.2 станом на травень 2014 року.

Таблиця 6.2 – Показники впровадження станцій АМГП-15/0,7 У1

Підприємство	Зав. номер	Дата введення в експлуатацію	Напрацювання, годин	Вироблено азоту, м ³
1 ВГСО	404	06.06.2005 р.	1 850	1 635 240
3 ВГСО	805	2005 р.	3 980	3 480 000
4 ВГСО	304	02.06.2005 р.	271	220 000
5 ВГСО	705	2005 р.	2 517	2 265 300
6 ВГСО	906	06.05.2007 р.	736	652 400
7 ВГСО	204	2004 р.	760	665 000
8 ВГСО	01/04	09.06.2005 р.	1 086	946 800
Львівсько-Волинське ВГСО	504	2004 р.	2 645	2 360 600
ОВГСО	604	2004 р.	420	350 585

Економічна ефективність упровадження станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП-15/0,7 У1:

Вартість придбання 1 станції АМГП-15/0,7 У1 ($Ц_{cm}$) – 4,981 млн грн.

Кількість придбаних станцій (Q_{cm}) – 9 шт.

Витрати на придбання 9 станцій становить

$$Z_n = Ц_{cm} \text{ і } Q_{cm} = 4,981 \text{ і } 9 = 44,829 \text{ млн грн.}$$

Питома вартість експлуатації й обслуговування 1 станції АМГП-15/0,7 У1 (C_e) – 140 грн/год.

Загальне напрацювання T_n – 12 536 годин.

Витрати на експлуатацію й обслуговування

$$Z_e = C_e \text{ і } Q_{cm} \text{ і } T_n = 140 \text{ і } 9 \text{ і } 12536 = 15\,795\,360 \text{ грн.}$$

Собівартість виробництва 1 м³ азоту $C_a = 0,35 \text{ грн/м}^3$.

Загальна кількість виробленого азоту $Q_a = 12\,625\,325,00 \text{ м}^3$.

Витрати на виробництво азоту

$$Z_a = C_a \text{ і } Q_a = 0,35 \text{ і } 12\,625\,325 = 4\,418\,863,75 \text{ грн.}$$

Вартість збереженого гірничошахтного устаткування за рахунок ліквідації пожеж $C_{об} = 565 \text{ млн грн.}$

Ліквідація втрат у видобутку вугілля обсягом $Q_y = 2 \text{ млн тонн.}$

Вартість вугілля за рахунок ліквідації втрат у видобутку $C_y = 1,5 \text{ млрд грн.}$

Економічний ефект

$$E_e = C_y + C_{об} - Z_n - Z_e - Z_a = 1\,500\,000\,000 + 565\,000\,000 - 44\,829\,000 - 15\,795\,360 - 4\,418\,863,75 = 1\,999\,956\,776,25 \text{ грн.}$$

ВИСНОВКИ

1. Створено нові композиційні матеріали деталей і вузлів компресорного устаткування. Проведено дослідження властивостей композиційних матеріалів промислового призначення з металевою матрицею. Розроблено й випробувано металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів. Розроблено установку для нанесення захисних покриттів на деталі, що дозволяє продовжити експлуатаційні параметри компресорних машин. Показано, що межа втоми і межа міцності вузлів шахтних компресорних установок збільшуються в 1,5–2 рази при нанесенні двошарових покриттів із композиційних матеріалів.

2. Створено енергозбережне компресорне устаткування нового покоління, де враховані всі основні стадії їх життєвого циклу. Уперше розроблено методичні основи розрахунків нестационарних режимів течії потоків, що несуть суспензію у трубопровідних системах на підставі результатів дослідження впливу концентрації і щільності твердої фази на параметри коливальних процесів у гетерогенному газовому середовищі, що дозволило встановити залежності декрементів пульсації швидкості і коливань тиску в технологічних ємностях від властивостей матеріалу, що транспортується й аеросуміші, акустичних і витратно-напірних характеристик компресорів та елементів аспіраційно-знепалювальних систем гірничих підприємств.

Виконано фундаментальні дослідження щодо створення методів розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів. Установлено, що найбільші коефіцієнти теплопередачі мають ребристі, пластинчасто-ребристі теплообмінники (ПРТ). Проведені дослідження показали, що сталь 20Х13 дозволяє за допомогою термічного оброблення паяних ПРТ одержати міцні і корозійностійкі ПРТ. Розроблено методи розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів шахтних компресорних установок. Розроблено методи підвищення надійності і довговічності теплообмінників. Випробування показали, що розроблений теплообмінник має високу зносостійкість у середовищі, засміченому абразивними частинками, хімічну стійкість у нейтральних (повітря, азот, газоподібні вуглеводні, вода, пара, нафтопродукти) і лужних середовищах, а також у розчинах деяких органічних кислот (оцтова, щавлева), в інших газоподібних і рідких середовищах.

3. Для генерування інертного газового середовища на основі азоту для забезпечення технологічних процесів у нафтовидобувній, газовій, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості розроблено азотну компресорну станцію. Розроблене і затверджене технічне завдання на виготовлення станції блоково-модульного виконання для виробництва 50 000 м³/добу газоподібного азоту для сайклінг-процесу на Котелевському газоконденсатному родовищі. Комплекс устаткування забезпечує одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту концентрацією не менше ніж 99 % з його подальшим накачуванням у свердловину ГКМ під тиском до 250 бар.

4. Для застосування в установках, які підвищують тиск, від низького в малодобітних газових свердловинах до тиску, необхідного для роботи газотран-

спортного комплексу, розроблено блокову компресорну станцію, а також дотискні гвинтові компресорні станції паливного газу типу СГВ для живлення газотурбінних електростанцій. На Бельському газоконденсатному родовищі реалізований проект гвинтової газової компресорної установки СГВв 315-20/035-25 У1, що забезпечує відбір газу із семи низьконапірних свердловин із залишковим тиском 0,11–0,2 МПа, відбір попутного нафтового газу від наявної на родовищі установки сепарації нафти, газу із танків зберігання і стабілізації газового конденсату, а також смолоскиповий газ, наявний на родовищі. Газ компримується в мережу споживача з тиском 1,7–2,5 МПа. За перший рік експлуатації здійснене додаткове видобування 12,0 млн м³ газу. Також уведено в експлуатацію дві аналогічні компресорні станції СГВв 315-20/0,5-24 У1 на нафтогазовому родовищі «Кенлик» у Республіці Казахстан, де вони подають попутний газ на електростанцію ЕГ-6000 виробництва підприємства «Мотор Січ». Розроблено компресорну станцію СКГ-127/6-12 УХЛ1, головним елементом якої є поршнева компресорна установка 6ГШ2.5-19/6-12С і способи транспортування попутного транспортного газу. Станція дозволяє одержувати попутний нафтовий газ тиском 12 МПа, застосовуваний у технологічних процесах нафтогазовидобувної промисловості та з іншою метою.

5. Викладено науково-практичні засади підвищення надійності й ефективності буріння та ремонту нафтових і газових свердловин із використанням високоефективних піногенеруючих пристроїв. З метою підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв шляхом створення дрібнодисперсної піни запропоновано піногенеруючий пристрій для насичення рідини повітрям або газом. Одержана залежність зміни швидкості звуку у водоповітряній суміші залежно від об'ємної газомісткості. Для пінистого потоку після стрибка ущільнення встановлено співвідношення між в'язкістю, коефіцієнтом тертя і втратами тиску на тертя стосовно до рідинної фази. Одержані залежності об'ємної газомісткості від ступеня аерації за різних значень тиску в приймальній камері. Теоретично встановлено, що при вмісті газу (повітря) 20–80 % в рідині (воді) з поверхнево-активними речовинами, для створення дрібнодисперсної піни швидкість потоку суміші перед стрибком ущільнення повинна досягати 30–40 м/с, а при вмісті газу (повітря) 80–95 % – 40–60 м/с. При збільшенні швидкості потоку рідини вище від встановленої межі проходить зниження ефективності піноутворення, оскільки швидкість руху потоку перед стрибком ущільнення зростає і відповідно зростає число Маха. Розроблено методи визначення оптимальної конструкції піногенеруючого устаткування.

6. Дослідження і випробовування піногенеруючого пристрою на свердловинах Полтавського ВБР БУ «Укрбургаз», глибина однієї з яких становила 4 700 м, показали високу ефективність пропозиції та адекватність результатів параметрам прогнозу, зокрема і запропонованої схеми обв'язки циркуляційної системи. Схема дає можливість зручного переходу промивання свердловини від рідини до піни і навпаки – забезпечуючи необхідні технологічні процеси. При руйнуванні піни, що виходила із свердловини, без використання хімічних піногасників, при повторних створеннях піни економія поверхнево-активних речовин становила більше ніж 50 %, оскільки немає потреби в нейтралізації дії хімі-

чних елементів, що входять до складу піногасників. Крім позитивного економічного ефекту, зменшення кількості використовуваних поверхнево-активних речовин дозволить покращити екологічний стан на території бурової станції.

7. Удосконалено технологію термогазового впливу на пласт із високов'язкими нафтопродуктами за рахунок використання розробленої компресорної установки високого тиску, що включає повітряні компресори першого і другого щаблів компримування. Технологія термогазового впливу із застосуванням компресорних установок БКУ20/35 реалізована на Вішанському родовищі РУП «ВО «Білорусьнафта». При застосуванні методу термогазового впливу на нафтовий пласт коефіцієнт вилучення нафти досягав 75 %, при середньопластовому тиску 26 МПа.

8. Викладено засади підвищення ефективності газліфтного видобування нафти компресорним способом, що може бути забезпечено застосуванням компресорного устаткування нового покоління з можливістю регулювання параметрів і режимів у необхідних межах. Для забезпечення надійності та безвідмовності роботи обладнання газліфтного комплексу доцільно використовувати високоефективні компактні рідинно-газові сепаратори (наприклад, СГВ-7). Для інтенсифікації геологорозвідувальних робіт і видобування на газонафтоносних родовищах розроблено і випробувано нову пересувну компресорну станцію СД 30/120 продуктивністю 30 м³/хв, тиском 12 МПа. Для ремонту й очищення магістральних нафтопроводів застосовані компресорні станції, створені на базі устаткувань АГНКС-45, АГНКС-60, АГНКС-75, призначені для подачі природного газу (метану), а для евакуації газу з магістральних газопроводів – МКС-600.

9. Розроблено спосіб утилізації шахтного газу діючих і закритих шахт шляхом його спалювання в спеціальній камері і запобігання його виділенню в атмосферу за допомогою контейнерної газоутилізаційної установки (УКГ-5/8). Установки можуть відкачувати газ безпосередньо з дегазаційної свердловини. Вибухозахищеність забезпечується конструктивними рішеннями за рахунок безперервного контролю вмісту метану. При концентрації метану 1 % установка відключається. Технічна продуктивність УКГ-5/8 обмежена 8 МВт теплової енергії, оптимальною тривалою потужністю 5 МВт. Установка здійснює постійний автоматичний аналіз газу на вміст СН₄, О₂ і СО₂.

10. Розроблено спосіб видобування метану, установку для дегазації підземних пластів та гвинтову шахтну компресорну установку із новою системою контролю і аварійного захисту. На підприємствах вугільної промисловості України впроваджені установки компресорні шахтні УКГШ-7,5/7, УКГШ-10/7, УКГШ-15/7, розробки концерну «НІКМАС» у кількості понад 1 148 установок продуктивністю 7,5–15 м³/хв. Установки експлуатуються з 2001 року. Шахтні компресорні установки типу УКГШ мають більш високий рівень пожежної безпеки, ніж застосовувані раніше установки ШВ-5. За час експлуатації не було зафіксовано жодного випадку загоряння, що мало місце при експлуатації попередніх компресорних установок інших типів.

11. Запропоновано модель виділення метану в тупиковому виробітку і визначений час досягнення вибухонебезпечної концентрації. При стаціонарному процесі швидкість надходження газу у виробку збігається зі швидкістю винесення газу з виробки, однак надходить у виробку чистий метан, а виноситься метаноповітряна суміш. Виконано моделювання процесів поділу повітря у порожнистоволоконних модулях, що дозволило оптимізувати конструкцію газороздільних модулів азотних мембранних компресорних станцій. Одержано залежності продуктивності газороздільних мембранних блоків від концентрації й температури. Розроблено установки для інертизації атмосфери, попередження і гасіння пожеж у гірничих виробках, гвинтові компресорні станції для одержання газоподібного азоту.

12. Розроблено, затверджено та уведено у дію нормативно-технічний документ – Стандарт Мінвуглепрому України. Правила використання газоподібного азоту для попередження і локалізації підземних пожеж (СОУ 10.1.202020852.001:2006). Виготовлена фахівцями ВАТ «НВАТ ВНДІкомпресормаш» станція АМГП-15/0,7 С У1 успішно пройшла заводські випробування на підприємстві – виготовлювачі і приймальні випробування в замовника (державне підприємство «Макіїввугілля»). Наприкінці 2003 р. станцію АМГП-15/0,7 С У1 було застосовано під час гасіння пожежі на одній із шахт ДП «Ровенькиантрацит». Оперативно доставлена на місце аварії, станція успішно зарекомендувала себе в реальних умовах пожежогасіння, подавши в гірничу виробку (зону горіння) 62 000 м³ азоту. За допомогою станції АМГП-15/0,7 С У1 пожежа була ліквідована за 72 год.

13. Викладено засади протипожежного захисту об'єктів нафтогазової промисловості, на складах зберігання паливо-мастильних матеріалів із застосуванням високоефективних піноутворювальних пристроїв.

14. Розроблено технології термостатування аерокосмічних апаратів. Розроблено робочий проект і виготовлено мобільний кондиціонер транспортної системи термостатування для подачі термостатуючого повітря із заданими параметрами в головний обтічник ракети-носія «Зеніт-2SLБ» і «Зеніт-3SLБ», а також під час їх транспортування на об'єкти підготовки і запуску ракети-носія.

15. Розроблено технології утилізації і когенерації звалищного газу установками УКГ, що вирішують проблему викидів в атмосферу забруднювальних органічних речовин.

16. Розроблено компресорні установки для бурових станків, які застосовуються у гірничорудній промисловості. Установки компресорні серії ВВ повітряні з гвинтовим компресором і приводом від електродвигуна, продуктивністю від 23 до 100 м³/хв і кінцевим абсолютним тиском 8–10 кгс/см² призначені для постачання стисненим повітрям різних систем пневматичних машин, інструментів та устаткування. З 2001 р. і до цього часу на об'єкти експлуатації було поставлено більше 210 компресорних установок на ГЗК України, Білорусі, Казахстану, Узбекистану, Туркменістану, Монголії та ін. Зазначеними компресорними установками продуктивністю 25 і 32 м³/хв оснащені бурові верстати виробництва ВАТ «Криворіжгормаш», ТОВ «Завод бурової техніки ДСД» (м. Кривий Ріг) та ряд закордонних.

17. Розроблено гвинтові компресорні станції серії ВВП для вироблення стисненого повітря і постачання ним пневматичних інструментів і механізмів для технологічних потреб під час проведення будівельно-монтажних і дорожніх робіт. Продуктивність гвинтових компресорних станцій від 2 до 20 м/хв.

18. Викладено досвід застосування азотних машин при консервації і зберіганні продуктів перероблення в харчовій галузі, застосування газоподібного азоту на фрукто- і овочесховищах, для зберігання зернових культур, у масложировій промисловості, для пакування харчових продуктів у нейтральному середовищі. Використання азотного середовища при зберіганні зерна злакових, бобових, олійних культур і зернопродуктів дозволяє збільшити термін зберігання зернопродуктів, істотно скоротити енергетичні витрати і споживання інших ресурсів, виключити використання токсичних хімічних фумігантів, запобігти втратам і зараженню зерна, звести до мінімуму механічні ушкодження зерна в процесі зберігання, знизити ймовірність загоряння, що може мати місце при зберіганні недостатньо сухих зернопродуктів.

19. Розроблено станції азотні переносні для різних галузей промисловості: машинобудування, енергетики, металургії, фармацевтичної, хімічної, коксохімічної галузі. Станції застосовані для підготовки для наливання пропанбутаном вагонів-цистерн. Вироблюваний станцією газоподібний азот подається в цистерни для витиснення кисню до залишкового вмісту 1 % і надлишкового залишкового тиску 0,5–0,7 кгс/см².

20. Розроблено і виготовлено комплексні системи охолодження різного технологічного устаткування (компресорні і турбодетандерні установки, системи підготовки газу, бурові установки, прохідницькі комбайни та ін.) на базі ефективних рекуперативних теплообмінників пластинчасто-ребристого, пластинчастого і трубчастого типів із робочим тиском середовища до 50 МПа. Для різних технологічних ліній, систем кондиціонування і вентиляції спроектовані та виготовлені системи холодопостачання із застосуванням сучасних високотехнологічних поршневих, гвинтових і спіральних компресорів.

21. Створено системи утилізації і рекуперації тепла. Застосування системи рекуперації тепла дозволяє зберегти більше ніж 70 % теплової енергії, що відводиться від компресорної установки, спрямувавши її на підігрів води або інших технологічних рідин. Система рекуперації вбудовується в масляний контур компресора і складається, як правило, з теплообмінника «масло – вода» (можливе застосування додаткового теплообмінника «повітря – вода»), запірно-регулювальної арматури, циркуляційного насоса (за необхідності) і з'єднувальних трубопроводів.

22. Розроблено компресорну техніку для рухомого складу залізничного транспорту. У період з 2002 по січень 2011 р. на підприємства залізничної інфраструктури доставлено 642 одиниці компресорного устаткування. Гвинтові компресорні станції серії НВЕ, що застосовуються на залізницях, мають широкий діапазон продуктивності, що дозволяє здійснити комплектацію залізничної станції оптимальним набором компресорної техніки. Також серійно випускаються пересувні гвинтові компресорні станції з дизельним приводом серії ВВП. Вони характеризуються високою маневреністю і прохідністю за рахунок засто-

сування одноосьового шасі, можуть транспортуватися як причіп автомобілем або на залізничній платформі. Технічні рішення, закладені в конструкцію компресорів типу КТ (КТ6, КТ7, КТбел), запас міцності і надійність обумовили їх серійне виробництво, що не припиняється й зараз. За роки серійного виробництва випущено понад 100 тис. поршневих компресорів цієї моделі. Компресори КТ6 експлуатуються в складі цілого ряду магістральних локомотивів, таких як ТЕМ18Д, ВЛ80, ВЛ10, 2Т10, ВЛ12, ВЛ85, ДЕ1, ТЕП60 та ін.

23. Розроблено компресори для гальмових систем рухомого складу залізничного транспорту. Технічне вдосконалення залізничного транспорту, зокрема локомотивів, вимагало нових рішень у створенні компресорів для рухомого складу. Освоєне серійне виробництво уніфікованих поршневих компресорів типу ПК. Компресори ПК-1,75А, ПК-3,5А, ПК-5,25А – двоступінчасті поршневі з V-подібним розміщенням циліндрів і повітряним охолодженням. На відміну від компресорів КТ компресори ПК високообертові, що дозволило за менших габаритів та питомої маси одержати необхідну продуктивність при меншій споживаній потужності. Станом на липень 2014 р. виготовлено понад 550 одиниць гальмових гвинтових компресорних установок ВВ-3,5/10, які успішно експлуатуються на електровозах 2ЕС6 і 2ЕС10, електровозі ЗЕС5К, тепловозі ЧМЕ-3М, модернізовані компанією «ZOS Zvolen» (Словаччина) разом із ТОВ «Тепловозоремонтний завод» (Полтава) та ін.

24. Викладено аспекти комплексного рішення проблем безпеки при розробленні родовищ вуглеводнів. Застосування нового компресорного устаткування: станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП у процесах видобування вугілля для запобігання і гасіння підземних пожеж, установок компресорних газоутилізаційних УКГ для утилізації шахтного метану й запобігання його вибухів, азотних компресорних станцій під час буріння, освоєння, інтенсифікації, ремонту газових та нафтових свердловин, розкритті продуктових газонафтоносних пластів дозволяє в комплексі вирішувати проблему безпеки під час розроблення родовищ вуглеводнів. Для підвищення безпеки роботи компресорного устаткування під час розроблення родовищ вуглеводнів розроблені смарт-системи керування, візуального контролю параметрів, захисних блокувань, захисного відключення локальних компресорних установок на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric, ComAp, Allen-Bradley та ін. Виконано моделювання безаварійної роботи гірників та безпечного керування процесом видобування при використанні смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем.

25. Проведене оцінювання економічної ефективності застосування компресорного устаткування нового покоління. Фактичний економічний ефект, одержаний за рахунок застосування способу гасіння підземних пожеж азотом, що забезпечило збереження устаткування і ліквідацію втрат у видобуванні вугілля, за 10 років експлуатації станції АМГП-15/0,7 У1 становив близько 2 млрд грн, при цьому було збережено більше 1000 робочих місць. Фактичний економічний ефект, одержаний за рахунок зниження емісії метану в атмосферу, реалізації положень Кіотського протоколу за 6 років використання способу утилізації метану з використанням установки УКГ-5/8 становив близько 20 млн грн. За ос-

новними науково-технічними показниками, а саме: обсягом відбору газу установки СГВв 315-20/035-25 У1, об'ємною продуктивністю установки БКУ 20/35 У1 для термогазового впливу на нафтовий пласт, обсягом утилізованого газу метану установкою УКГ-5/8; обсягом виробленого установкою АМГП-15/0,7 У1 азоту та ефективністю ліквідації втрат у видобуванні вуглеводнів та збереженні устаткування і робочих місць; створені технології та способи використання компресорного устаткування нового покоління перевищують кращі вітчизняні та зарубіжні аналоги.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Монографії, навчальні посібники

1. Блюсс Б. А. Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд / Б. А. Блюсс, Н. А. Головач. – Днепропетровск : Полиграфист, 1999. – 126 с.
2. Бондаренко Г. А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / Г. А. Бондаренко, П. Е. Жарков. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2003. – 134 с.
3. Бондаренко Г. А. Компрессорное оборудование. Устройство, эксплуатация и маркетинг : учеб. пособ. / Г. А. Бондаренко. – Сумы : СумГУ, 2004. – 106 с.
4. Бондаренко Г. А. Винтовые воздушные компрессорные станции : учеб. пособ. / Г. А. Бондаренко. – Сумы : Изд-во СумГУ, 2005. – 255 с.
5. Стадник А. Д. Полимерные композиты и нанокompозиты в магнитных полях / А. Д. Стадник, Г. В. Кирик. – Сумы : ИТД «Университетская книга» ; Издательство «Слобожанщина», 2005. – 240 с.
6. Теплообменные аппараты компрессорных установок. Исследования, конструкция, технология / В. Н. Радзиевский, Г. В. Кирик, А. М. Лавренко, А. М. Котов. – Сумы : Издательство «Слобожанщина», 2007. – 317 с.
7. Бондаренко Г. А. Технология использования сжатых газов : курс лекций / Г. А. Бондаренко. – Сумы : СумГУ, 2011. – 272 с.
8. Кирик Г. В. Конструкция и смазка винтовых маслозаполненных воздушных компрессоров / Г. В. Кирик, Л. Н. Багдасаров, О. А. Македонский. – Сумы, 2008. – 110 с.
9. Кирик Г. В. Новые композиционные материалы / Г. В. Кирик, В. Н. Радзиевский, А. Д. Стадник. – Сумы : ИТД «Университетская книга», 2011. – 310 с.
10. Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий / [А. Д. Погребняк, А. А. Лозован, Г. В. Кирик и др.]. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 344 с.
11. Бондаренко Г. А. Компрессорные станции : учеб. пособ. : в 2 ч. Ч. 1. Воздушные компрессорные станции / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Сумы : СумГУ, 2012. – 344 с.
12. Бондаренко Г. А. Основы научных исследований в энергетике : учеб. пособ. / Г. А. Бондаренко. – Сумы : СумГУ, 2013. – 201 с.
13. Шевченко В. Г. Научно-методические основы определения готовности систем «горнорабочие – очистной комплекс» к повышению безопасности угледобычи / В. Г. Шевченко. – Киев : Наукова думка, 2013. – 280 с.
14. Жарков П. Е. Газовые компрессорные станции / П. Е. Жарков, Г. А. Бондаренко, В. Н. Радзиевский. – Сумы : ИТД «Университетская книга», 2015. – 285 с.

15. Бондаренко Г. А. Технологія використання стиснутих газів : підручник / Г. А. Бондаренко, В. І. Мілованов, В. М. Ярошенко. – Одеса : Зовнішрекламсервіс, 2015. – 449 с.

Статті в спеціалізованих та міжнародних виданнях

16. Бондаренко Г. А. Вихревой лабиринтный компрессор / Г. А. Бондаренко, В. Н. Зиневич, Л. В. Черепов // Компрессорное и холодильное машиностроение : науч.-техн. реф. сб. / ЦИНТИхимнефтемаш. – Москва, 1974. – № 2. – С. 9–10.

17. Бондаренко Г. А. Исследование влияния некоторых конструктивных параметров на работу лабиринтного компрессора / Г. А. Бондаренко, Л. В. Черепов // Труды Николаевского кораблестроительного ин-та. – 1974. – Вып. 86. – С. 97–101.

18. Бондаренко Г. А. Определение погрешностей экспериментальных характеристик турбин и компрессоров с помощью метода Монте-Карло / Г. А. Бондаренко // Энергетическое машиностроение : респ. межвед. науч.-техн. сб. – Харьков : Вища школа, 1980. – Вып. 30. – С. 136–142.

19. Бондаренко Г. А. О применении лабиринтно-вихревого импеллера для уплотнения проточной части центробежного компрессора / Г. А. Бондаренко, Л. В. Черепов // Труды Николаевского кораблестроительного ин-та. – 1981. – Вып. 172. – С. 76–81.

20. Бондаренко Г. А. О влиянии перетеканий газа на эффективность центробежной малорасходной ступени компрессора / Г. А. Бондаренко, В. Н. Довженко, Л. В. Черепов // Труды Николаевского кораблестроительного ин-та. – 1982. – Вып. 187. – С. 49–52.

21. Бондаренко Г. А. Результаты обработки узлов центробежного компрессора для перспективных технологических процессов / Г. А. Бондаренко, Г. Н. Зиневич // Сб. тр. «ЛПИ». – 1983. – С. 18–22.

22. Бондаренко Г. А. Регулирование перепада в системе уплотнений валов тербокомпрессоров высокого давления / Г. А. Бондаренко, В. Р. Пищик, В. Н. Морозов // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1988. – № 9. – С. 17–19.

23. Бондаренко Г. А. Основные научно-технические проблемы создания центробежных компрессоров для нефтяной и газовой промышленности / Г. А. Бондаренко, Н. Д. Федоренко, В. Е. Сухиненко // Химическое и нефтяное машиностроение. – Москва, 1989. – № 8. – С. 12–14.

24. Бондаренко Г. А. Упругогидродинамический анализ конструкции центробежных компрессоров высокого давления / Г. А. Бондаренко // Химическое и нефтяное машиностроение. – Москва, 1989. – № 8. – С. 17–19.

25. Bondarenko H. A. The evolution of Sumy rotating equipment I nt. / H. A. Bondarenko // Symposium VNIИ Campressormash (Sumy) : Materials Int. Conf. „Revolve 89”. – Novacorp, Calgary, Canada, 1989. – P. 41–47.

26. Бондаренко Г. А. Вибрационное обследование компрессора высокого давления установки УКСП-16/500 для сайклинг-процесса / Г. А. Бондаренко,

А. А. Стеценко // Тематический сборник трудов «Вопросы расчета и исследований центробежных компрессоров сверхвысокого давления» / ЦИНТИхимнефтемаш. – Москва, 1990. – С. 24–32.

27. Бондаренко Г. А. Анализ характеристик и методика проектирования центробежного компрессора для установок газлифта нефти с использованием программно-вычислительного комплекса САРТУ-КС / Г. А. Бондаренко, В. П. Парафейник, Ю. С. Бухолдин, А. Б. Братков // VIII Всесоюзная научно-техническая конференция «Создание компрессорных машин и установок, обеспечивающих интенсивное развитие отраслей топливно-энергетического комплекса»: материалы конференции ВНИИкомпрессормаш. – Сумы, 1991. – С. 177–191.

28. Bondarenko H. A. Desiqu experience and technological developments of dry gas seals / H. A. Bondarenko, N. I. Verbitsky // Mater Int. Conf. „REVOLVE-92”. – Novacorp, Calgary, Canada, 1992. – P. 54–62.

29. A magnetic fluid date as anew element in sealing technology / H. Bondarenko, A. Vislovich, V. Medvedev et al. // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – Paris, 1993. – Vol. 122. – P. 411–414.

30. Бондаренко Г. А. Постановка задачи динамического расчета сложных газовых контуров компрессорной установки закачки газа в пласт / Г. А. Бондаренко, И. В. Юрко // Компрессорная техника и пневматика. – Санкт-Петербург, 1994. – Вып. 3. – С. 46–48.

31. Бондаренко Г. А. Система мониторинга и диагностики центробежных компрессоров / Г. А. Бондаренко, А. А. Стеценко // Труды 3-го Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров». – Санкт-Петербург, 1997. – С. 212–215.

32. Bondarenko H. A. Bodania prowadzone w instytucie Nikmasz-Sumy / H. Bondarenko // Materialy konferencji naukowo-technicznej “Doswiadezenia w badaniu i modernizacji spreiarek prreplywowych”. – Lodz-Belchatow, 1997.

33. Новая технология изготовления сварно-паяных рабочих колес центробежных компрессоров с применением автовакуумного нагрева / В. Н. Радзиевский, П. Е. Жарков, Г. Г. Ткаченко и др. // Сб. трудов Международного симпозиума «Потребители-производители компрессоров и компрессорного оборудования – 2000». – Санкт-Петербург, 2000. – С. 225–228.

34. Блюсс Б. А. Математические модели систем аспирации и обеспыливания в горно-обогачительных технологиях / Б. А. Блюсс, С. В. Дзюба, Е. В. Семененко // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 25. – С. 33–43.

35. Блюсс Б. А. Определение рациональных параметров систем аспирации и обеспыливания в технологиях обогащения / Б. А. Блюсс, С. В. Дзюба, Е. В. Семененко // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 26. – С. 29–38.

36. Лавренко А. М. Выбор материала для изготовления пластинчато-ребристых воздушных охладителей компрессорных установок / А. М. Лавренко, П. Е. Жарков, В. Н. Радзиевский // Компрессорная техника и пневматика. – 2002. – № 7. – С. 19–20.

37. Дослідження впливу силових полів на теплофізичні та механічні характеристики полімерних композиційних матеріалів / Г. В. Кирик, О. Д. Стадник, Н. В. Іваній, В. А. Дяченко // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2002. – № 13 (46). – С. 159–166.

38. Жарков П. Е. Электроэрозионное легирование как средство повышения ресурса рабочих колес центробежных компрессоров / П. Е. Жарков, В. Б. Тарельник // Труды 10-й Международной научно-технической конференции «Герметичность, вибронадежность и экологическая безопасность насосного и компрессорного оборудования» – «ГЕРВИКОН – 2002». – Сумы, 2002. – С. 127–133.

39. Бондаренко Г. А. Методы доводки проточных частей центробежных компрессоров при изменении свойств газов / Г. А. Бондаренко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – Сумы : СумДУ, 2002. – № 9 (42). – С. 39–46.

40. Бондаренко Г. А. Типоразмерный ряд винтовых воздушных компрессорных установок «НПАО ВНИИкомпрессормаш» / Г. А. Бондаренко, П. Е. Жарков // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2002. – Вып. 9 (5–9). – С. 24–31.

41. Бондаренко Г. А. Инженерная теория регулирования винтовых компрессоров / Г. А. Бондаренко // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – Сумы : СумДУ, 2002. – № 3 (49). – С. 63–71.

42. Повышение эффективности пластинчато-ребристых охладителей масла для винтовых компрессорных установок / А. М. Лавренко, П. Е. Жарков, А. М. Котов и др. // Химическое и нефтяное машиностроение : международный научно-технический и производственный журнал. – Москва : Российская инженерная академия ; Московский государственный университет инженерной экологии, 2003. – № 6. – С. 22–24.

43. Zharkov P. E. Increasing the Service Life of Centrifugal Compressors by Electroerosion Alloying of Impellers / P. E. Zharkov, V. B. Tarel'nik // Chemical and petroleum engineering. – 2003. – Vol. 39, Iss. 1–2. – P. 27–30.

44. Raising Efficiency of Plate-and-Fin Oil Coolers for Screw Compressor Plants / A. M. Lavrenko, P. E. Zharkov, A. M. Kotov et al. // Chemical and petroleum engineering. – 2003. – Vol. 39, Iss. 5–6. – P. 337–340.

45. Бондаренко Г. А. Определение экономической эффективности компрессоров на основе стоимости их жизненного цикла / Г. А. Бондаренко, Т. А. Власенко // Компрессорная техника и пневматика. – 2003. – № 8. – С. 33–36 с.

46. Зеленев Ю. В. Влияние термомагнитной обработки на теплофизические и механические свойства полимеров / Ю. В. Зеленев, А. Д. Стадник, Г. В. Кирик // Пластические массы. – 2003. – № 3. – С. 17–19.

47. Бондаренко Г. А. Экспериментальное определение влияния плавающих уплотнений на динамику ротора центробежного компрессора высокого давления / Г. А. Бондаренко // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2003. – № 1. – С. 21–26.

48. Бондаренко Г. А. Определение экономической эффективности компрессоров на основе стоимости их жизненного цикла / Г. А. Бондаренко,

Т. А. Власенко // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2003. – № 8. – С. 34–37.

49. Передвижные азотные компрессорные станции с мембранным разделительным блоком / Р. З. Негреба, Г. В. Кирик, М. Э. Лышчак и др. // Компрессорная техника и пневматика. – 2004. – № 3. – С. 17–18.

50. Кирик Г. В. Електропровідність полімерних композиційних матеріалів, сформованих в обертовому магнітному полі / Г. В. Кирик, О. Д. Стадник // Вісник СумДУ. Серія Фізика, математика, механіка. – 2004. – № 8 (67). – С. 95–101.

51. Жарков П. Е. Локальные компрессорные станции – основа энергосберегающих технологий / П. Е. Жарков, Г. А. Бондаренко // Праці Міжнародної науково-практичної конференції «Передові компресорні технології – користувачам». – Суми : СумДУ, 2004. – Т. 1. – С. 8–17.

52. Жарков П. Е. Состояние и перспективы развития компрессоростроения в Украине / П. Е. Жарков // Труды XIII Международной научно-технической конференции по компрессоростроению. Том I. Компрессорная техника и пневматика в XXI веке. – Сумы, 2004. – С. 59–64.

53. Лях М. М. Напрямки вдосконалення конструкцій газосепараторів промивної рідини / М. М. Лях, Е. В. Юр'єв // Тези 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Нафта і газ України – 2004», м. Судак, 2004. – Судак, 2004. – 2 с.

54. Бондаренко Г. А. Регулирование винтовых компрессоров переводом на холостой ход / Г. А. Бондаренко // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2004. – № 2. – С. 37–41.

55. Методика энергоаудита заводских систем сжатого воздуха / Г. А. Бондаренко, А. С. Надточий, А. П. Шут, В. И. Тимченко // Труды Международной научно-практической конференции «Передовые компрессорные технологии – потребителю». – Сумы : СумГУ, 2004. – Т. 1. – С. 108–116.

56. Кирик Г. В. Перспективы применения полимерных материалов в машиностроении / Г. В. Кирик, А. А. Салюк, И. В. Матвиенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2005. – № 1. – С. 4–8.

57. Кирик Г. В. Оптимизация конструкции и условий эксплуатации компрессорного оборудования как основа энергосбережения в компрессоростроении / Г. В. Кирик, А. М. Лавренко, В. В. Карасенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2005. – № 2 (2). – С. 20–22.

58. Жарков П. Е. Создание типоразмерного ряда азотных станций с мембранными разделительными блоками / П. Е. Жарков, Ю. В. Бережной // Технические газы. – 2005. – № 5. – С. 29–34.

59. Some thermodynamic effects in thin film adhesion / A. M. Chornous, G. V. Kirik, I. Yu. Protsenko, A. D. Stadnik // Functional Materials. – 2005. – Vol. 12, № 1. – P. 51–54.

60. Стадник А. Д. Технология получения и свойства покрытий на композиционных материалах / А. Д. Стадник, Г. В. Кирик, А. М. Черноус // Металлофиз. новейшие технол. – 2005. – Т. 27, № 8. – С. 1024–1029.

61. Жарков П. Е. Оценка технического уровня винтовых компрессоров / П. Е. Жарков, Г. С. Подошев // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 2 (2). – С. 48–51.
62. Бондаренко Г. А. Локальные компрессорные станции – основа энергосберегающих технологий / Г. А. Бондаренко, П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 4 (6). – С. 36–39.
63. Бондаренко Г. А. Оптимизация режимов работы центробежного компрессора при переменных нагрузках / Г. А. Бондаренко, О. М. Сидько // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2006. – № 3 (5). – С. 23–26.
64. Kyryk Grigoriy. Reception of Metal Coverings on Polymeric Materials By Methods of Conductors Electric Explosion / Grigoriy Kyryk and Alexander Stadnick // Sixth international symposium on polymer surface modification: relevance to adhesion / University of Cincinnati, Ohio, USA. – 2007. – Vol. 4, № 2. – P. 16.
65. Сторишко В. Е. Разработка технологий и оборудования для повышения метаноотдачи угольных пластов / В. Е. Сторишко, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 4 (10). – С. 18–23.
66. Исследование усталостного разрушения некоторых деталей компрессорных машин / Г. В. Кирик, В. М. Раб, П. Е. Жарков, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 2 (8). – С. 14–18.
67. Применение азотных машин для обеспечения безопасной работы предприятий угольной промышленности / Г. В. Кирик, Ю. В. Бережной, А. Д. Стадник, А. Адамус // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 1 (7). – С. 7–11.
68. Кирик Г. В. Перспективы применения полимерных композиционных материалов в компрессоростроении / Г. В. Кирик // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 3 (9). – С. 7–10.
69. Структура, свойства и получение нанокристаллических покрытий, осаждаемых несколькими способами / [В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков и др.] // Успехи физики металлов. – 2007. – № 3, Т. 8. – С. 171–246.
70. Сторишко В. Е. Разработка технологий и оборудования для повышения метаноотдачи угольных пластов / В. Е. Сторишко, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 4 (10). – С. 18–23.
71. Застосування газових вогнегасних речовин для пожежогасіння та флегматизування горючих середовищ з урахуванням вимог екологічної безпеки / В. М. Жартівський, Ю. В. Цапко, Г. В. Кирик, О. Д. Стадник // Коммунальное хозяйство городов : науч.-техн. сб. – Киев : Техника, 2007. – Вып. 79. – С. 369–379.
72. Анализ технических возможностей создания модулей ожижения для азотно-мембранных установок / В. М. Арсеньев, С. М. Ванеев, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2007. – № 3. – С. 5–9.

73. Нанокристаллические и нанокompозитные покрытия, структура, свойства / [В. Л. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – № 2, Т. 5. – С. 4–27.

74. Структура и физико-химические свойства комбинированных нанокompозитных покрытий / [А. Д. Погребняк, М. М. Данилюк, Ф. Ф. Комаров и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – № 3–4, Т. 5. – С. 186–196.

75. Grigoriy Kyryk. Reception of Metal Coverings on Polymeric Materials By Methods of Conductors Electric Explosion / Grigoriy Kyryk and Alexander Stadnick // Sixth international symposium on polymer surface modification: relevance to adhesion. University of Cincinnati, Ohio, USA. – 2007. – Vol. 4, № 2. – P. 16.

76. Вытеснение метаном воздуха из тупиковых выработок угольных шахт / Э. П. Фельдман, А. И. Спожакин, Н. А. Калугина и др. // Тезисы докладов 2-й Международной научно-практической конференции «Пути повышения безопасности горных работ в угольной отрасли». – Макеевка : МакНИИ, 2007. – С. 93–96.

77. Перспективи застосування мембранного азоту / П. С. Пашковський, В. М. Жартовський, Ю. В. Цапко та ін. // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Пожежна безпека – 2007». – Черкаси, 2007. – С. 279–281.

78. Лях М. М. Модернізація сепараційного устаткування / М. М. Лях, Е. В. Юр'єв, В. А. Власов // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці», «ІФНТУНГ-40», Івано-Франківськ, 16–20 квітня 2007 р. – Івано-Франківськ, 2007. – 1 с.

79. Оптимизация схемного решения криомодуля для азотно-мембранной винтовой установки / [В. М. Арсеньев, С. М. Ванеев, Г. В. Кирик и др.] // Холодильная техника і технологія. – 2008. – № 2 (112). – С. 9–13.

80. Особенности структуры и свойств твердых Ti-Al-N и сверхтвердых Ti-Si-N нанокompозитных покрытий осажденных PVD в В4 разряде / [А. Д. Погребняк, В. М. Береснев, С. И. Проценко и др.] // Физическая инженерия поверхности. – 2008. – № 3–4, т. 6. – С. 221–227.

81. Накопление метана в тупиковых выработках и бункерах угольных шахт / [А. Д. Алексеев, Э. П. Фельдман, Г. В. Кирик и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск. Аэрология. – Москва, 2008. – № 5. – С. 262–269.

82. Перспективные направления совершенствования и разработки шахтного компрессорного оборудования / [Б. А. Грядущий, Г. В. Кирик, А. Н. Коваль и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 4 (1). – С. 14–15.

83. Сторишко В. Е. Новые технологии и оборудование для увеличения метаноотдачи угольных пластов / В. Е. Сторишко, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2008. – Вып. 80. – С. 40–46.

84. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / Б. А. Грядущий, Г. В. Кирик, А. Н. Коваль и др. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 2–5.
85. Кирик Г. В. Киотский протокол и оборудование концерна «Укрро-металл» для реализации его положений / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – Сумы, 2008. – № 2. – С. 2–7.
86. Кирик Г. В. Развитие топливно-энергетического комплекса и стратегия выпуска энергоэффективной компрессорной техники / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 3 (13). – С. 2–8.
87. Ткаченко Г. Г. Композиционная коррозионностойкая износостойкая наплавка на железоникелевой основе уплотнительных колец шаровых кранов / Г. Г. Ткаченко, В. Н. Радзиевский, П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1. – С. 86–89.
88. Бондаренко Г. А. Планирование затрат на основе определения стоимости жизненного цикла машин и оборудования / Г. А. Бондаренко, Т. А. Власенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 93–95.
89. Бондаренко Г. А. Некоторые особенности работы компрессора на сеть / Г. А. Бондаренко, В. В. Шишов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2008. – № 1 (11). – С. 62–66.
90. Математична модель сепарації газорідинної суміші в сепараторі інерційного типу / М. М. Лях, Е. В. Юр'єв, В. М. Вакалюк, Я. В. Солоничний // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ : Всеукраїнський наук.-техн. журнал / Ів.-Франк. нац. у-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2008. – № 1 (26). – С. 67–74.
91. Кирик Г. В. Развитие топливно-энергетического комплекса и стратегия выпуска энергоэффективной компрессорной техники / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, А. Д. Стадник // Материалы Международной научно-практической конференции «Использование пневматической энергии и оборудования для ее получения в горнорудной отрасли». – Сумы, 2008. – С. 6–20.
92. Kyryk G. Usage of membrane gas separation stations fire prevention and extinguishing in mine working / G. Kyryk // 21th World mining congress. – Krakow, 2008. – P. 101.
93. Изменение концентрации метана и кислорода в бункерах угольных шахт / Э. П. Фельдман, Н. А. Калугина, Л. Д. Ожегова и др. // Материалы XVIII Международной научной школы им. академика С. А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Алушта, 2008. – С. 317–319.
94. Нанокompозитные защитные покрытия на основе Ti-Al-N/Ni-Cr-B-Si-Fe / А. Д. Погребняк, А. А. Дробышевская, В. В. Берестнев и др. // Труды XVIII Международного совещания «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2008. – С. 349–356.

95. Нестеренко Н. П. Влияние рабочих параметров пеногенерирующих устройств на сохранение коллекторских свойств продуктивных пластов / Н. П. Нестеренко, В. М. Савик, М. М. Лях // PRACE Instytutu Nafty i Gazu : материалы конференции GEOPETROL 2008 [Закопане], 15–18 вересня 2008 р. – Краков, 2008. – № 150. – С. 693–698.
96. Nanocomposite protective coatings based on Ti-N-Cr/Ni-Cr-B-Si-Fe, their structure and properties / [Alexander D. Pogrebnyak, Marya M. Danilinenok, Vladimir V. Uglov et al.] // Vacuum. – 2009. – Vol. 83. – P. 235–239.
97. Радзиевский В. Н. Исследование теплообменных аппаратов компрессорных машин / В. Н. Радзиевский, Г. В. Кирик, А. М. Лавренко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета / ДонГТУ. – 2009. – Вып. 29. – С. 28–39.
98. Кирик Г. В. Експериментальне вивчення азотного пожежогасіння вугілля / Г. В. Кирик, О. Д. Стадник, Ю. В. Цапко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4 (18). – С. 41–43.
99. Кирик Г. В. Альтернативная энергетика и использование потенциала концерна «Укрросметалл» для ее развития / Г. В. Кирик, А. Д. Стадник, В. И. Мирошниченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 2 (16). – С. 24–30.
100. Особенности структурного состояния и механических свойств покрытий ZrN и Zr(Ti)-Si-N, полученных ионно-плазменными методами / [А. Д. Погребняк, О. В. Соболев, В. М. Береснев и др.] // Письма в Журнал технической физики. – Санкт-Петербург : Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 2009. – Вып. 19, т. 35. – С. 103–110.
101. Перспективные направления разработки и совершенствования шахтного компрессорного оборудования / Б. А. Грядущий, Г. В. Кирик, А. Н. Коваль, В. В. Лобода и др. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 4 (14). – С. 2–4.
102. Кирик Г. В. Компрессорная техника концерна «Укрросметалл» в многоотраслевом хозяйстве Украины / Г. В. Кирик // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2009. – № 3 (17). – С. 15–19.
103. Дослідження руху промивальної рідини внутрішньою поверхнею камери дегазатора гідроциклонного типу / В. М. Вакалюк, М. М. Лях, Я. В. Солоничний та ін. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ : всеукраїнський наук.-техн. журнал / Ів.-Франк. нац. у-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2009. – № 3 (32). – С. 12–17.
104. Stadnick A. New ways of drawing metal films on polymeric materials / A. Stadnick, G. Kyryk // Seventh international symposium on polymer surface modification: relevance to adhesion. University of Maine, Orono, Maine, USA. – 2009. – Vol. 6, № 1. – P. 7.
105. Опыт использования и перспективы разработки установок для альтернативной энергетики / С. М. Ващенко, В. Г. Концевич, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник // Исследование, конструирование и технология изготовления компрессорных машин : материалы VIII Международной научно-технической

конференции молодых специалистов. – Казань : Изд-во «Слово», 2009. – С. 107–109.

106. Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв для первинного розкриття продуктивних горизонтів з аномально-низькими пластовими тисками / М. М. Лях, В. М. Тимошенко, В. М. Савик, Т. М. Яцишин // Міжнародна науково-технічна конференція «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» : матеріали конференції. – Івано-Франківськ, 20–23 жовтня 2009 р. – С. 73.

107. Триботехнические и механические свойства нанокompозитных покрытий Ti-Al-N, осажденных ионно-плазменным методом / [В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, П. В. Турбин и др.] // Трение и износ : международный научный журнал. – Гомель : Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси. – 2010. – № 5, т. 31. – С. 467–474.

108. Влияние двойной имплантации ионов на физико-химические и механические свойства поверхностных сплавов ВТ-6 и ВТ-22 / [А. Д. Погребняк, С. Н. Братушка, Л. В. Маликов и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – Москва, 2010. – № 12. – С. 43–52.

109. Жарков П. Е. Продукты газификации угля – доступная альтернатива природному газу / П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 3 (21). – С. 2–6.

110. Кирик Г. В. Компрессорная техника для технологий сланцевого газа / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, В. Н. Радзиевский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 4 (22). – С. 2–6.

111. Бондаренко Г. А. Центробежный компрессор высокого давления: смелый проект / Г. А. Бондаренко // Компрессорная техника и пневматика. – 2010. – № 7. – С. 15–21.

112. Игнатьев И. Г. Перспективы применения азотных компрессорных станций в технике высоких напряжений / И. Г. Игнатьев, П. Е. Жарков, С. П. Оверчик // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2010. – № 2 (20). – С. 11–13.

113. Використання багатосоплових піногенеруючих пристроїв для виготовлення пінистих розчинів при розкриванні продуктивних пластів з низькими пластовими тисками / В. М. Тимошенко, В. М. Савик, В. П. Троцький, М. М. Лях // Питання розвитку газової промисловості України : збірник наукових праць. – Харків : УкрНДІгаз, 2010. – Вип. 38. – С. 60–63.

114. Гайдабрус Б. В. Системный подход к разработке линейки компрессорного оборудования концерна «Укрросметалл» для обеспечения многоотраслевого хозяйства Украины / Б. В. Гайдабрус, Г. В. Кирик, В. Г. Концевич // Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты : сборник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции МГТУ им. Баумана. – Москва, 2010. – С. 17–20.

115. Гайдабрус Б. В. Системы удаленного мониторинга компрессорных станций концерна «Укрросметалл» как инструмент информационной поддержки этапа эксплуатации жизненного цикла / Б. В. Гайдабрус, Г. В. Кирик, В. Г. Концевич // Вакуумная, компрессорная техника и пневмоагрегаты : сбор-

ник трудов III Всероссийской молодежной научно-практической конференции МГТУ им. Баумана. – Москва, 2010. – С. 129–136.

116. Заполнение метаном тупиковых выработок угольных шахт при прекращении их проветривания / [Э. П. Фельдман, Г. В. Кирик, А. Д. Стадник и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – Новосибирск : Институт горного дела СО РАН. – 2011. – № 1. – С. 22–33.

117. Жарков П. Е. Компрессорная техника концерна «Укрросметалл» в развитии железнодорожного транспорта / П. Е. Жарков, А. А. Салюк, П. В. Косенко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 1 (23). – С. 2–7.

118. Стратегія розробки газоконденсатних родовищ України з використанням азоту для підтримання пластового тиску / [Є. С. Бікман, С. В. Кривуля, О. В. Ляшенко та ін.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 3 (25). – С. 15–18.

119. Кирик Г. В. Состояние и перспективы производства энергетического оборудования в концерне «Укрросметалл» / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, С. И. Диденко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 2 (24). – С. 2–7.

120. Игнатъев И. Г. Кондиционирование установок высокого напряжения при помощи азотных компрессорных установок / И. Г. Игнатъев, П. Е. Жарков, С. П. Оверчик // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2011. – № 3 (25). – С. 52–54.

121. Бондаренко Г. А. Особенности математического моделирования входных регулирующих аппаратов центробежных компрессоров / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Вісник нац. техн. університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тем. випуск «Енергетика та теплотехнічні процеси й устаткування». – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 5. – С. 90–95.

122. Бондаренко Г. А. Система мониторинга и диагностики сложного компрессорного оборудования / Г. А. Бондаренко, А. А. Стеценко, О. А. Стеценко // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2011. – № 2. – С. 35–40.

123. Бондаренко Г. А. Численное моделирование регулирования работы центробежного компрессора с ВРА / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2011. – № 3. – С. 10–16.

124. Бондаренко Г. А. Обеспечение ремонта компрессорного оборудования по фактическому состоянию / Г. А. Бондаренко, В. И. Кармазин, А. А. Стеценко // Труды Международной конференции «Гервикон-2011». – Сумы, 2011.

125. Бондаренко Г. А. Сопоставление результатов численного и физического исследования входного регулирующего аппарата центробежного компрессора / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Энергетические и теплотехнические процессы и оборудование. Вестник НТУ «ХПІ». – 2011. – № 5. – С. 90–94.

126. Лях М. М. Аналіз та вдосконалення конструкції піногенеруючого устаткування / М. М. Лях, В. М. Савик, Н. В. Федоляк // Міжнародна науково-

технічна конференція «Нафтогазова енергетика – 2011 : матеріали конференції, Івано-Франківськ, 10–14 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 22.

127. Лях М. М. Удосконалення газорідинного сепараційного обладнання / М. М. Лях, Е. В. Юр'єв, О. В. Ващаєв // Анотації Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика – 2011», ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ, 10–14 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 23.

128. Триботехнические свойства нанокompозитных покрытий Ti-Zr-Si-NN, осажденных ионно-плазменным методом / [В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, П. В. Турбин и др.] // Трение и износ : междунаrod. науч. жунал. – Гомель : Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси. – 2012. – № 3, т. 33. – С. 215–222.

129. Кирик Г. В. Компрессорное оборудование концерна «Укрросметалл» в решении современных задач энергетики страны / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 1 (27). – С. 2–8.

130. Новая газовая винтовая компрессорная техника концерна «Укрросметалл» для увеличения добычи газа в Украине / П. Е. Жарков, А. Г. Нестеренко, И. И. Хомин, Р. З. Негреба // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 2 (28). – С. 2–6.

131. Жарков П. Е. К вопросу утилизации природных углеводородных газов / П. Е. Жарков, В. И. Коваленко, В. П. Ткачева // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 3 (29). – С. 2–7.

132. Масс-спектрометр для мониторинга азотной газовой изоляции установок высокого напряжения / [Е. Г. Игнатьев, О. В. Запорожец, В. К. Запорожец и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 3 (29). – С. 51–53.

133. Сумские машиностроители в модернизации промышленности Украины / [Г. В. Кирик, О. В. Гайковой, А. В. Зеленко и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 4 (30). – С. 2–5.

134. Жарков П. Е. К вопросу утилизации природных углеводородных газов / П. Е. Жарков, В. И. Коваленко, В. П. Ткачева // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 3 (29). – С. 2–7.

135. Лях М. М. Аналіз результатів теоретичних та комп'ютерних досліджень піногенеруючого пристрою / М. М. Лях, В. М. Савик // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012 : сборник научных трудов Sworld. – Одесса : Куприенко, 2012. – Т. 8, вип. 4. – С. 77–87.

136. Аналіз і раціоналізація конструкції піногенеруючого устаткування або пристрою / В. М. Савик, М. М. Лях, В. М. Вакалюк, Я. В. Солоничний // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – № 3 (44). – С. 63–69.

137. Савик В. М. Оптимізація параметрів піногенеруючих пристроїв / В. М. Савик, М. М. Лях, В. М. Михайлюк // Геологія. Гірництво. Нафтогазова справа : науковий журнал. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – № 2. – С. 128–137.

138. Дослідження процесу піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу / В. М. Савик, М. М. Лях, В. М. Вакалюк, Н. В. Федоряк //

Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. – № 4 (45). – С. 110–117.

139. Бондаренко Г. А. Моделирование течения в боковых зазорах между рабочими колесами и статором турбомашин / Г. А. Бондаренко, В. М. Бага // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 1 (27). – С. 22–27.

140. Рубель А. В. Перспективы применения оборудования концерна Укр-росметалл в модернизации угольной отрасли Украины / А. В. Рубель, П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1 (31). – С. 2–6.

141. Кирик Г. В. Развитие топливно-энергетического комплекса и стратегия выпуска энергоэффективной компрессорной техники / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков, А. Д. Стадник // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 3 (13). – С. 28.

142. Лях М. М. Особливості механізму піноутворення в піногенеруючих пристроях ежекторного типу / М. М. Лях, В. М. Савик, В. М. Вакалюк та ін. // Науковий вісник ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2013. – № 1. – С. 98–104.

143. Війтенко В. І. Аналіз і модернізація обладнання для експлуатації Гуцулівського газового родовища / В. І. Війтенко, І. Ф. Концур, М. М. Лях, О. В. Ващаєв // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ : всеукраїнський наук.-техн. журнал / Ів.-Франк. нац. тех. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2013. – № 4 (49). – С. 18–27.

144. Бондаренко Г. А. Оптимизация параметрической модели входного регенеративного аппарата центробежного компрессора / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 12. – С. 43–49.

145. Бондаренко Г. А. Метод оптимизации газодинамических характеристик осерадиальной компрессорной ступени со входным регулирующим аппаратом / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХП». – 2013. – № 12. – С. 49–53.

146. Бондаренко Г. А. Исследование влияния протечки на структуру потока на входе в рабочее колесо / Г. А. Бондаренко, В. А. Негрейко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 1 (31). – С. 18–23.

147. Бондаренко Г. А. Исследование характеристик однорядных тамдентных кольцевых решеток с поворотными лопатками / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2013. – № 4 (34). – С. 20–25.

148. Бондаренко Г. А. Некоторые особенности численного моделирования течения в колесе центробежного компрессора / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Компрессорная техника и пневматика. – 2013. – № 8. – С. 33–39.

149. Жарков П. Е. Разработка и создание новых воздушных систем термостатирования / П. Е. Жарков, Г. Г. Ткаченко, В. Н. Радзиевский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2014. – № 4 (38). – С. 2–5.

150. Булат А. Ф. Развитие научно-технических основ разработки и использования шахтного компрессорного оборудования / А. Ф. Булат,

Б. В. Бокий, Г. В. Кирик // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 114. – С. 3–18.

151. Булат А. Ф. Энергоэффективные компрессорные машины в процессах добычи угля и метана / А. Ф. Булат, Б. В. Бокий, Г. В. Кирик // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 115. – С. 3–15.

152. Булат А. Ф. Опыт разработки и внедрения шахтного компрессорного оборудования / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 78–83.

153. Шевченко В. Г. Моделирование безаварийной работы горнорабочих при использовании устройств получения дополнительной информации о горнотехнических объектах / В. Г. Шевченко, М. С. Зайцев // Науковий вісник НГУ. – Днепропетровск, 2014. – № 1. – С. 105–113.

154. Булат А. Ф. Комплексное решение проблем безопасности при разработке месторождений углеводородов с применением компрессорного оборудования / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, В. Г. Шевченко // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск. – 2014. – Вып. 119. – С. 3–13.

155. Крижанівський Є. І. Оптимізація енергоспоживання в бурінні на прикладі гідроциклонної установки / Є. І. Крижанівський, М. М. Лях, Ю. М. Бурда // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ : всеукраїнський наук.-техн. журнал / Ів.-Франк. нац. техн. ун-т нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2014. – № 4 (49). – С. 98–108.

156. Лях М. М. Технічне діагностування сепараційного обладнання в нафтогазовій галузі / М. М. Лях, О. В. Ващаєв, Н. В. Федоляк // Сьома Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтобазо-промислового обладнання» : матеріали конференції (Івано-Франківськ, 25–28 листопада 2014 р.). – Івано-Франківськ, 2014. – С. 174–179.

157. Бондаренко Г. А. Применение блочно-иерархического подхода к проектированию и оптимизации системы ВРА для центробежного компрессора / Г. А. Бондаренко, І. В. Юрко // Енергетичні та теплотехнічні процеси устаткування. Вестник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 11. – С. 145–153.

158. Bondarenko H. A. Flew Situlation in a Labyrinth Seal / H. A. Bondarenko, V. N. Vaga, I. A. Bashlak // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland : Trans Tech Publications, 2014. – Vol. 630 (2044). – P. 234–239.

159. Bondarenko H. A. A new approach to decigning the s-shaped annular duct for in industrial centrifugal compressor / H. A. Bondarenko, I. V. Yurko // Interactional Journal of Rotating Machinery. – 2014. Article I.D.925368, 10 pages. ISSN 1542-3034.

160. Бондаренко Г. А. Экспериментальные исследования лабиринтного уплотнения при различных геометрических и режимных параметрах / Г. А. Бондаренко, В. М. Бага // Герметичность и вибронадежность насосного и компрессорного оборудования : сб. докладов XIV Международной НТК. – Сумы : Изд-во ООО «ПД «Папирус», 2014.

161. Булат А. Ф. Современные решения по повышению эффективности разработки месторождений углеводородов на основе энергосберегающего компрессорного оборудования / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, В. Г. Шевченко // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 120. – С. 3–16.

162. Кирик Г. В. Обоснование режимных параметров шахтного компрессорного оборудования и способов его применения при добыче угля и метана / Г. В. Кирик, П. Е. Жарков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 2 (40). – С. 6–10.

163. Кирик Г. В. Разработка методов и способов повышения надежности и долговечности компрессорных установок горных машин с применением высокотемпературной вакуумной пайки / Г. В. Кирик, Г. Г. Ткаченко // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 2 (40). – С. 40–45.

164. Компрессорная установка высокого давления для термогазового воздействия на нефтяной пласт / А. Ф. Булат, Г. В. Кирик, П. Е. Жарков и др. // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 122. – С. 3–12.

165. Лях М. М. Вибір раціональних параметрів піногенеруючих пристроїв / М. М. Лях, В. М. Савик, Т. Л. Тамамянц, О. А. Плитус // Матеріали 4-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика – 2015», Івано-Франківськ, 21–24 квітня 2015 р. – Івано-Франківськ, 2015. – С. 77–81.

166. Лях М. М. Підвищення якісних показників піногенеруючих пристроїв / М. М. Лях, В. М. Савик, Н. В. Федоляк // XI Міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості і освіті», 1–5 червня 2015 р., м. Варна, Болгарія. – Варна, 2015. – Том 1. – С. 67–74.

167. Бондаренко Г. А. Исследование течения в лабиринтном уплотнении / Г. А. Бондаренко, В. М. Бага // Вісник НТУ «ХП». – 2015. – № 15 (1124). – С. 25–31.

168. Бондаренко Г. А. Влияние конструктивных параметров на расходные характеристики лабиринтных уплотнений / Г. А. Бондаренко, В. М. Бага // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 1 (39). – С. 25–31.

Патенти

169. А. с. 482020 СССР. Вихревой компрессор / Бондаренко Г. А., Черепов Л. В., Апанасенко А. И. – Оpubл. в БИ, 1975, № 38.

170. А. с. 691605 СССР. Многоступенчатый центробежный компрессор высокого давления / Бондаренко Г. А., Зиневич Г. Н., Черепов Л. В. и др. – Оpubл. в БИ, 1979, № 38.

171. А. с. 926362 СССР. Малорасходный центробежный компрессор высокого давления / Бондаренко Г. А., Черепов Л. А. – Оpubл. в БИ, 1982, № 17.

172. А. с. I0547II СССР. Экспериментальная центробежная турбомашина / Бондаренко Г. А., Черепов Л. В., Довженко В. Н. – Оpubл. в БИ, 1983, № 42.

173. А. с. I0608I5 СССР. Малорасходная ступень центробежной машины / Бондаренко Г. А., Черепов Л. В. – Оpubл. в БИ, 1983, № 46.

174. А. с. I0718I3 СССР. Малорасходная ступень центробежного компрессора / Бондаренко Г. А., Черепов Л. В. – Оpubл. в БИ, 1984, № 4.

175. А. с. 1343112 СССР. Способ сборки многоступенчатого компрессора с горизонтальным разъемом статора / Бондаренко Г. А. – Оpubл. в БИ, 1987, № 37.

176. А. с. 1384831 СССР. Опорно-уплотнительный узел вала компрессора / Бондаренко Г. А. – Оpubл. в БИ, 1988, № 12.

177. А. с. 1569486 СССР. Уплотнение вала / Бондаренко Г. А., Вербицкий Н. И., Павлюк С. А. – Оpubл. в БИ, 1990, № 21.

178. А. с. 1634907 СССР. Торцовое уплотнение / Бондаренко Г. А., Палладий А. В., Вербицкий Н. И., Гаев Е. П. – Оpubл. в БИ, 1991, № 10.

179. А. с. 1725041 СССР. Турбодетандерный агрегат / Бондаренко Г. А., Пшик В. Р., Марцинковский В. С., Богданов В. А. – Оpubл. в БИ, 1991, № 13.

180. А. с. 1826632 СССР. Способ регулирования компрессора магистрального газопровода и устройство для его осуществления / Бондаренко Г. А., Шерстюк А. Н., Сухиненко В. Е., Трошкин О. А., Ивашкина Т. П. – Оpubл. в БИ, 1992, № 25.

181. Пат. 13530 Україна. Спосіб збирання багатоступеневого компресора з горизонтальним роз'єднанням статора / Бондаренко Г. А. – Бюл. № 2, 1997.

182. Пат. 15945 А Україна. В22D 19/08. Спосіб наплавки металеві поверхні / Радзієвський В. М., Жарков П. Є., Гарцунов Ю. Ф., Ткаченко Г. Г. – № 93005192 ; заявл. 24.04.1993 ; опубл. 30.06.1997, Бюл. № 3.

183. Patent USA US 6.213.472 B1 (США) Shaft seal / Bondarenko H. A., Fedorenko N. D., Pavluk S. A., Kolesnik S. A. – 2001.

184. Пат. 98031288 Україна, F04C29/02. Спосіб роботи шахтної підземної компресорної станції / Лобода В. В., Махов Г. Г., Коваль А. М., Мялковський В. Й., Машиниченко А. Г., Ященко О. М., Савицький В. М., Матвеев Ю. О. – № 46051 ; заявл. 13.03.98 ; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5.

185. Пат. 53744 Україна. С21D1/74. Спосіб формування товстостінного таврового з'єднання / Радзієвський В. М., Жарков П. Є., Ткаченко Г. Г., Гарцунов Ю. Ф., Дудченко В. Л. – № u200041877 ; заявл. 04.04.2000 ; опубл. 17.02.2003, Бюл. № 2.

186. Пат. 56529 Україна. F28D 9/00. Теплообмінник / Радзієвський В. М., Лавренко О. М., Жарков П. Є., Ткаченко Г. Г., Котов О. М. – № u200275779 ; заявл. 12.07.2002 ; опубл. 15.05.2003, Бюл. № 5.

187. Пат. 61216А Україна, 7G12B17/02. Спосіб одержання електромагнітних екранів / Кирик Г. В., Стадник О. Д. – № 2002086683 ; заявл. 13.08.2002 ; опубл. 17.01.03, Бюл. № 11.

188. Пат. Российская Федерация, E21F5/00, A62C3/02. Способ работы шахтной азотно-компрессорной установки / Коваль А. Н., Пашковский П. С., Лобода В. В., Филимонов С. Г., Жарков П. Е., Лавренко А. М., Грядущий Б. А. – № 2262600 ; заявл. 13.03.98 ; опубл. 20.10.05, Бюл. № 29.

189. Пат. 2003087401 Україна, E21f 5/00. Спосіб вироблення газоподібного азоту з атмосферного повітря за допомогою азотно-компресорної установки / Грядущий Б. А., Пашковський П. С., Лобода В. В., Філімонов С. Г., Коваль А. М., Жарков П. Є., Лавренко О. М. – № 61850 ; заявл. 15.09.05 ; опубл. 15.09.05, Бюл. № 9.
190. Пат. 27878 Україна. F28D 9/00. Теплообмінник пластинчасто-ребристий / Радзієвський В. М., Лавренко О. М., Жарков П. Є., Ткаченко Г. Г., Котов О. М. – № u200613868 ; заявл. 26.12.2006 ; опубл. 26.11.2007, Бюл. № 19.
191. Пат. 27498 Україна, E21F 7/00. Станція для утилізації шахтного газу / Кирик Г. В., Жарков П. Є., Діденко О. С. – № u200701391 ; заявл. 09.02.2007 ; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 20.
192. Пат. 29646 Україна, E21F 7/00. Спосіб видобування метану / Кирик Г. В., Жарков П. Є., Стадник О. Д. – № u200708824 ; заявл. 31.07.2007 ; опубл. 25.01.2008, Бюл. № 1.
193. Пат. 35166 Україна, E21F 7/00. Спосіб видобутку метану з вуглепородного масиву / Кирик Г. В., Стадник О. Д., Авраменко Т. Г., Корнух О. С., Луценко Н. М. – № u200800057 ; заявл. 02.01.2008 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17.
194. Пат. 35169 Україна, E21F 5/00. Спосіб ліквідації початкової стадії підземних пожеж / Кирик Г. В., Жарков П. Є., Стадник О. Д., Бережний Ю. В. – № u200800440 ; заявл. 14.01.2008 ; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 17.
195. Пат. 35717 України, МПК B01F 3/04, E02B 8/00. Піногенеруючий пристрій / Лях М. М., Савик В. М., Лужаниця О. В., Тимошенко В. М., Фурса Р. П., Вакалюк В. М. – Заявл. 10.08.2006; опубл. 10.10.2008, Бюл. 19. – 6 с.
196. Пат. 88204 Україна, B01D 53/14. Установа для утилізації викидів бензинових парів / Кирик Г. В., Лавренко О. М., Стадник О. Д. – № a200714461 ; заявл. 21.12.2007 ; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
197. Пат. 88184 Україна, A62C 37/00. Спосіб попередження і гасіння пожежі в закритих об'єктах / Кирик Г. В., Жарков П. Є., Стадник О. Д., Бережний Ю. В. – № a200808821 ; заявл. 31.07.2007 ; опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
198. Пат. 42464 України, МПК (2009) F04F 1/00. Схема об'язки циркуляційної системи при бурінні з промиванням свердловини піною / Савик В. М., Лях М. М., Тимошенко В. М., Лужаниця О. В., Педенко Ю. О., Серий В. О. – Заявл. 30.12.2008 ; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13. – 6 с.
199. Пат. 48315 Україна, F25B 30/00. Теплонасосна установка / Кирик Г. В., Жарков П. Є., Коваленко В. І. – № u200910345 ; заявл. 12.10.2009 ; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.
200. Пат. 89267 Україна, Гідроциклон / Лях М. М., Вакалюк В. М., Яцишин Т. М., Лях Ю. М., Вільчик О. Г. – 12.10.2009, Бюл. № 19 ; 11.01.2010, Бюл. № 1.
201. Пат. 58015 Україна. B23K31/00. Спосіб формування паяного товстостінного сталевого таврового з'єднання / Радзієвський В. М., Жарков П. Є., Ткаченко Г. Г., Будник А. Ф. – № u201010944 ; заявл. 13.10.2010 ; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.

202. Пат. 58931 Україна, F04C 29/02. Гвинтова компресорна установка / Кирик Г. В., Негреба Р. З., Белозьоров В. О., Шаповаленко О. І. – № u201012621 ; заявл. 25.10.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
203. Пат. 58934 Україна, E21F 1/08. Агрегат для дегазації підземних пластів / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Нікулін Л. К., Левша І. І. – № u201012624 ; заявл. 25.10.2010 ; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
204. Пат. 63983 Україна, E21F 1/08. Установка для дегазації підземних пластів / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Левша І. І., Пономаренко Б. А. – № u201104019 ; заявл. 04.04.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
205. Пат. 62113 Україна, F17D5/06. Установка для підтримання газозаповнених кабелів і кабельних шляхів під надлишковим тиском / Жарков П. Є., Оверчик С. П., Ткачова В. П. – № u201101312 ; заявл. 07.02.2011 ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
206. Пат. 60099 Україна, F04C29/02. Дотискна блокова компресорна станція / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Негреба Р. З., Левша І. І. – № u201013882 ; заявл. 22.11.2010 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.
207. Пат. 61915 Україна, F28D9/04. Теплообмінник пластинчасто-ребристий / Радзієвський В. М., Жарков П. Є., Ткаченко Г. Г., Будник А. Ф. – № u201010313 ; заявл. 25.08.2010 ; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
208. Пат. 65143 Україна, F24D17/00. Теплонасосна установка / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Конотоп В. В., Оверчик С. П., Нечитайло О. М. – № u201106160 ; заявл. 17.05.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
209. Пат. 64783 Україна, F04D29/44. Ступінь статора відцентрованого багатоступінчастого насоса / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Діденко С. І., Гордєєв В. М., Шеин А. Ю., Резвих В. В. – № u201101102 ; заявл. 01.02.2011 ; опубл. 25.11.2011, Бюл. № 22.
210. Пат. 63983 Україна, E21F1/08. Установка для дегазації підземних пластів / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Левша І. І., Пономаренко Б. А. – № u201104019 ; заявл. 04.04.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
211. Пат. 63856 Україна, F15B 21/04. Масловідділювач / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Левша І. І., Шаповаленко О. І. – № u201102895 ; заявл. 12.03.2011 ; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
212. Пат. 63552 Україна, F01N 3/04. Спосіб вироблення енергії в компактному електроенергетичного агрегаті / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Конотоп В. В. – № u201103582 ; заявл. 25.03.2011 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 19.
213. Пат. 62970 Україна, F04D1/06. Багатоступінчастий відцентровий насос / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Діденко С. І., Гордєєв В. М., Шеин А. Ю., Резвих В. В. – № u2011016382 ; заявл. 14.02.2011 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.
214. Пат. 62278 Україна, F04C23/00. Компресорний агрегат / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Лещенко В. І., Бондаренко О. М.,

Косенко П. В., Гуржий А. В. – № u201109001 ; заявл. 18.07.2011 ; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6.

215. Пат. 68311 Україна, F04C 18/00. Роторний компресор / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Івашова А. Ф. – № u201109598 ; заявл. 01.08.2011 ; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6.

216. Пат. 66571 Україна, F04C 18/00. Роторна компресорна установка / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Івашова А. Ф. – № u201107342 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

217. Пат. 66450 Україна, F04D29/04. Насос / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Діденко С. І., Гордєєв В. М., Шеин А. Ю., Рєзвих В. В. – № u201105140 ; заявл. 22.04.2011 ; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

218. Пат. 74689 Україна, C21D 1/74. Азотна компресорна станція / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Бережний Ю. В., Кравченко Р. В., Михеєнко М. О. – № u201204229 ; заявл. 05.04.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21.

219. Пат. 74299 Україна, B01D 53/14. Установка для утилізації викидів бензинових парів / Кирик Г. В., Салюк А. А., Лещенко В. І. – № u201203745 ; заявл. 08.03.2012 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20.

220. Пат. 73490 Україна, C22C 38/44. Сплав для виготовлення зносостійких деталей машин / Кирик Г. В., Шитов А. О., Рибалко В. П. – № u201202945 ; заявл. 13.03.2012 ; опубл. 25.09.2012, Бюл. № 18.

221. Пат. 72070 Україна, F04B 41/00. Поршневий багатоступінчастий компресор з W-подібним дворядним розміщенням циліндрів / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Шуваєв Л. В., Король О. О. – № u201114948 ; заявл. 16.12.2011 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.

222. Пат. 71810 Україна, E21F 3/00. Пристрій для підігріву та подання повітря в шахтний ствол / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Конотоп В. В., Ткачова В. П. – № u201200915 ; заявл. 30.01.12 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

223. Пат. 71792 Україна, C21D 1/74. Установка для приготування азотної захисної атмосфери / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Кравченко Р. В., Михеєнко М. О. – № u201200688 ; заявл. 23.01.12 ; опубл. 25.07.2012, Бюл. № 14.

224. Пат. 70765 Україна, F01D 5/34. Лопатка турбомашини / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Лавренко О. М., Мамонов Д. О. – № u201114328 ; заявл. 25.12.11 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

225. Пат. 69796 Україна, F04B9/02. Поршневий двоступінчастий компресор / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Шуваєв Л. В., Король О. О. – № u201113376 ; заявл. 14.11.11 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

226. Пат. 69665 Україна, F25B 39/02. Теплообмінна система / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Белозьоров В. О., Негреба Р. З., Радзівєвський В. М. – № u201112262 ; заявл. 19.10.11 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

227. Пат. 69664 Україна, F04C 29/02. Блокова компресорна станція / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Жарков П. Є., Негреба Р. З., Левша І. І. – № u201112259 ; заявл. 19.10.11 ; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9.

228. Пат. 68855 Україна, F24C 7/00. Пристрій для одержання тепла при піролізі органічних матеріалів / Кирик Г. В., Стадник О. Д. – № u201112391 ; заявл. 21.10.11 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

229. Пат. 68691 Україна, H02P 5/00. Лінія керування пускача електроприводу / Дашутін Г. П., Кирик Г. В., Белозьоров В. О., Шаповаленко О. І., Корольов О. М. – № u201110392 ; заявл. 26.08.11 ; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

230. Пат. 70767 Україна, B32B 5/00. Виріб з двошаровим покриттям / Кирик Г. В., Погребняк О. Д., Береснев В. М., Стадник О. Д. – № u201114330 ; заявл. 05.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

231. Пат. 72904 Україна, C23C 14/14. Металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів / Кирик Г. В., Погребняк О. Д., Береснев В. М., Стадник О. Д. – № u201205628 ; заявл. 08.05.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.

232. Пат. 86316 Україна, F16K 3/08. Трубопровідна засувка / Жарков П. Є., Мороз В. В., Денисенко В. І., Беляєв А. П. – № u201308204 ; заявл. 01.07.2013 ; опубл. 25.12.2013, Бюл. № 24.

233. Пат. 77168 Україна, C21D 1/74. Азотна компресорна станція / Дашутін Г. П., Жарков П. Є., Бережний Ю. В., Кравченко Р. В., Михеєнко М. О. – № u201211517 ; заявл. 05.10.2012 ; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2.

234. Пат. 77955 Україна, МПК B01F 3/04, E02B 8/00. Піногенеруючий пристрій багатосопловий / Савик В. М., Лях М. М., Михайлюк В. В.; заявл. 03.05.12 ; опубл. 11.03.13. Бюл. № 5. – 6 с.

235. Пат. 87501 Україна, F25D 15/02. Установа для виробництва аміаку / Дашутін Г. П., Жарков П. Є., Алексєєв В. О., Шишов В. В., Остапенко В. П. – № u201310203 ; заявл. 19.08.2013 ; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3.

236. Пат. 92347 Україна, F16K 3/08. Трубопровідна засувка / Жарков П. Е., Мороз В. В., Беляєв А. П. – № u201402808 ; заявл. 20.03.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.

237. Пат. 95885 Україна, G01F1/00. Мобільна установка для повірки або калібрування вузлів та засобів обліку газу / Балабай О. П., Дашутін Г. П., Кузьменко Ю. В., Щупак І. В., Жарков П. Е., Андрійшин Н. М., Гордеєнко В. В., Негреба Р. З. Чернишенко О. М. – № u201408133 ; заявл. 18.07.2014 ; опубл. 12.01.2015, Бюл. № 1.

238. Пат. 99340 Україна. Лабіринтне ущільнення / Бондаренко Г. А., Бага В. М. – 2015, Бюл. № 10.

Державні і галузеві нормативні документи

239. ДСТУ 3160-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик. Загальні вимоги / Бондаренко Г. А., Стеценко А. А., Федоренко М. Д., Нацвін А. М., Шуваєв В. Е. – Київ : Держстандарт України, 1995. – 11 с.

240. ДСТУ 3160-95. Компресорне обладнання. Вібраційні характеристики і захист від вібрації. Правила викладання та оформлення / Бондаренко Г. А., Стеценко А. А., Федоренко М. Д. – Київ : Держстандарт України, 1996. – 17 с.

241. ДСТУ 3160-95. Компресорне обладнання. Визначення вібраційних характеристик відцентрових компресорів та норми їх вібрації / Бондаренко Г. А., Стеценко А. А., Федоренко М. Д., Нацвін А. М. – Київ : Держстандарт України, 1996. – 18 с.

242. Правила використання газоподібного азоту для попередження та локалізації підземних пожеж : СОУ 10.1.202020852.001:2006 / розробники : Кузьменко О., Беліков І., Бондаренко В., Брюханов О., Грядущий Б., Лобода В., Савостьянов О., Тарасов В., Кирик Г., Жарков П., Оверчик С. – 2007. – (Стандарт Мінвуглепрому України).

Наукове видання

Булат Анатолій Федорович,
Кирик Григорій Васильович,
Бондаренко Герман Андрійович та ін.

КОМПРЕСОРНЕ УСТАТКУВАННЯ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНІВ

Монографія

За загальною редакцією академіка НАН України А. Ф. Булата

Художнє оформлення обкладинки І. М. Дубовікової
Редактори: Н. З. Ключко, Н. В. Лисогуб, С. М. Симоненко
Комп'ютерне верстання В. Г. Шевченка

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 17,90. Обл.-вид. арк. 26,90. Тираж 300 пр. Зам. №

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