

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

БР.ГМІ-80.00.00.000 ПЗ

Група ГМІ-21-1

Роман Гіщак

2025

Міністерство освіти і науки України  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
Інститут інженерної механіки та робототехніки  
Кафедра нафтогазових машин та обладнання

**Гіщак Роман Романович**

(прізвище, ім'я, по-батькові)

УДК 622.24 + 621.694.2

## **БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

**Розроблення та дослідження дозувального струминного насоса  
системи подачі інгібіторів в свердловину**

(назва роботи)

**Інжиніринг і сервісне обслуговування нафтогазових машин та обладнання**

(назва освітньої програми)

**133 – Галузеве машинобудування**

(шифр і назва спеціальності)

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

Здобувач освітнього ступеня Р.Р. Гіщак  
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Паневник Денис Олександрович, доктор філософії, доцент  
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри

доцент Я. Т. Федорович

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

# ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Інститут ІІМ Кафедра нафтогазових машин та обладнання  
Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування  
ОПП «Інжиніринг і сервісне обслуговування нафтогазових машин та обладнання»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри НГО  
\_\_\_\_\_ Я.Т. Федорович  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ

Студенту \_\_\_\_\_ Гіщаку Роману Романовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи Розроблення та дослідження дозувального струминного насоса системи подачі інгібіторів в свердловину

Затверджена наказом № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_ .2025 р.

2 Термін здачі студентом закінченої роботи 10.06.2025 р.

3 Вихідні дані до роботи: технічна документація та технічні характеристики на свердловинні струминні насоси, літературні джерела

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

Вступ 1 Аналіз конструкцій обладнання для дозованої подачі хімічних реагентів 1.1

Застосування інгібіторів в нафтогазовій промисловості 1.2 Основні схеми дозувальних насосів 1.3 Основні схеми технологічних блоків для подавання реагентів 2

Обґрунтування можливості застосування дозувальних струминних насосів 2.1 Аналіз особливостей робочого процесу свердловинного струминного насоса 2.2 Аналіз

досвіду проектування дозувального струминного насоса 3 Розроблення конструкції дозувального струминного насоса 3.1 Схема компоновки дозувального струминного

насоса 3.2 Опис конструкції дозувального струминного насоса 4 Моделювання робочого процесу дозувального струминного насоса 4.1 Аналіз робочого процесу

дозувального струминного насоса 4.2 Розрахунок параметрів роботи ежекційної системи 5 Побудова 3Д моделей дозувального струминного насоса. Висновки. Перелік

посилань на джерела

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням креслень)

5.1 Конструкції дозувальних насосів (С1) – 1 арк. формату А1

5.2 Технологічні блоки для дозування реагентів (С2) – 1 арк. формату А1

5.3 Дозувальний струминний насос (СК) – 1 арк. формату А1

5.4 Деталювання дозувального струминного насоса – 1 арк. формату А1

5.5 Схема встановлення дозувального струминного насоса (С3) – 1 арк. формату А1

5.6 Графічні залежності робочого процесу дозувального струминного насоса (Гр1) – 1 арк. формату А1

5.7 3Д моделі елементів дозувального струминного насоса (С4) – 1 арк. формату А1

6 Консультанти по роботі (за необхідністю).

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

6 Дата видачі завдання 18.02.2025

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер і назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
Вступ. 1 Аналіз конструкцій обладнання для дозованої подачі хімічних реагентів	10.03.2025 р.	
2 Обґрунтування можливості застосування дозувальних струминних насосів	10.03.2025 р.	
3 Розроблення конструкції дозувального струминного насоса	10.04.2025 р.	
4 Моделювання робочого процесу дозувального струминного насоса	10.05.2025 р.	
5 Побудова 3Д моделей дозувального струминного насоса	20.05.2025 р.	
<i>Графічна частина проекту</i>	10.06.2025 р.	

**Студент**

\_\_\_\_\_   
 Особистий підпис

Гіщак Р.Р.   
 Розшифровка підпису

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_   
 Особистий підпис

Паневник Д.О.   
 Розшифровка підпису

## РЕФЕРАТ

Бакалаврська робота Гіщака Р.Р. на тему «Розроблення та дослідження дозувального струминного насоса системи подачі інгібіторів в свердловину» складається з пояснювальної записки, викладеної на 62 аркушах формату А4, яка вміщує 5 розділів, 23 рисунки, 20 найменувань використаних джерел, і графічного матеріалу загальним обсягом 7 аркушів формату А1.

Об'єктом дослідження є дозувальний струминний насос.

Мета роботи полягає у розробленні конструкції дозувального струминного насоса для подачі хімічних реагентів в наземні технологічні трубопроводи.

У бакалаврській роботі наведено аналіз конструкцій обладнання для дозованої подачі хімічних реагентів та особливості застосування інгібіторів в нафтогазовій промисловості. Розглянуто особливості робочого процесу свердловинного струминного насоса та проаналізовано досвід проектування дозувальних струминних насосів. Використовуючи результати проведеного аналізу розроблена схема компоновки та конструкція дозувального струминного насоса. При моделюванні робочого процесу дозувального струминного насоса обґрунтовано існування особливих режимів його експлуатації та визначені основні характеристики ежекційної системи при її використанні в умовах синусоїдальної зміни витрати робочого потоку, яку створює занурений плунжерний насос з наземним приводом у вигляді верстата-качалки. Використовуючи основні закони гідродинаміки отримане рівняння характеристики гідравлічної системи дозувального струминного насоса. Розроблений розрахунковий алгоритм та побудовані діаграми зміни робочої та інжектваної подачі дозувального струминного насоса. Використовуючи сучасні комп'ютерні програми побудовані 3Д моделі дозувального струминного насоса та його окремих елементів.

Ключові слова: ускладнення при експлуатації свердловин, корозія трубопроводів, інгібітори корозії, дозувальний насос, струминний насос, система подачі інгібітора.

## ABSTRACT

Bachelor's thesis by Gishchak R.R. on the topic "Development and research of a dosing jet pump for the system of supplying inhibitors to the well" consists of an explanatory note, laid out on 62 sheets of A4 format, which contains 5 sections, 23 figures, 20 names of used sources, and graphic material with a total volume of 7 sheets of A1 format.

The object of the study is a dosing jet pump.

The purpose of the work is to develop the design of a dosing jet pump for supplying chemical reagents to surface technological pipelines.

The bachelor's thesis provides an analysis of the structures of equipment for the dosed supply of chemical reagents and the features of the use of inhibitors in the oil and gas industry. The features of the working process of a downhole jet pump are considered and the experience of designing dosing jet pumps is analyzed. Using the results of the analysis, a layout diagram and design of a dosing jet pump are developed. When modeling the working process of a metering jet pump, the existence of special modes of its operation was substantiated and the main characteristics of the ejection system were determined when it was used in conditions of sinusoidal change in the flow rate of the working flow, which is created by a submerged plunger pump with a ground drive in the form of a pumping machine. Using the basic laws of hydrodynamics, an equation of the characteristics of the hydraulic system of a metering jet pump was obtained. A calculation algorithm was developed and diagrams of changes in the working and injected flow of a metering jet pump were constructed. Using modern computer programs, 3D models of a metering jet pump and its individual elements were constructed.

Keywords: complications in the operation of wells, pipeline corrosion, corrosion inhibitors, metering pump, jet pump, inhibitor supply system.

## ЗМІСТ

Вступ	6
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОЗОВАНОЇ ПОДАЧІ ХІМІЧНИХ РЕАГЕНТІВ	9
1.1 Застосування інгібіторів в нафтогазовій промисловості	9
1.2 Основні схеми дозувальних насосів	16
1.3 Основні схеми технологічних блоків для подавання реагентів	23
2 ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОЗУВАЛЬНИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ	29
2.1 Аналіз особливостей робочого процесу свердловинного струминного насоса	29
2.2 Аналіз досвіду проектування дозувального струминного насоса	35
3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА	40
3.1 Схема компоновки дозувального струминного насоса	40
3.2 Опис конструкції дозувального струминного насоса	44
4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА	47
4.1 Аналіз робочого процесу дозувального струминного насоса	47
4.2 Розрахунок параметрів роботи ежекційної системи	52
5 ПОБУДОВА 3Д МОДЕЛЕЙ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА	55
ВИСНОВКИ	59
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	60

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В практиці розробки родовищ залежно від зміни в часі темпів відбору нафти і газу виділяють три періоди: зростаючого, постійного і спадаючого видобутку вуглеводнів. Останній період можна вважати, як найскладнішим, зважаючи на тенденцію постійного зниження видобутку вуглеводнів і різноманітних ускладнень. Даний період продовжується до досягнення мінімального рентабельного рівня відбору нафти і газу з родовища [1].

Проблемам підвищення вуглеводневилучення нафтогазоконденсатних пластів на виснажених родовищах завершальної стадії розробки присвячені роботи К.С Баснієва, С.М. Бузінова, О.І. Гриценко, С.Н. Закірова, Г.А. Зотова, Р.М. Кондрата, Р.М. Тер-Саркісова, П.Т. Шмиглі, У. Блеклі та ін. Більшість нафтогазових родовищ України виснажені на 70-80 % [1] і перебувають на завершальній стадії розробки. Під час експлуатації нафтогазоконденсатних родовищ виникають багато проблем, які призводять до ускладнень при видобуванні вуглеводнів. Від своєчасності їх вирішення залежить подальша експлуатація свердловин. Під час експлуатації газових та газоконденсатних свердловин виникають різні ускладнення, зокрема:

- гідратуутворення;
- накопичення рідини;
- солевідкладення;
- корозія свердловинного обладнання та ін.

Гідратуутворення негативно впливають на роботу свердловин та призводять до їх зупинок. Інколи трапляються випадки відкладення глухих гідратних пробок, що супроводжується простоем свердловин, тому необхідно застосовувати на практиці різні профілактичні заходи з метою попередження гідратуутворення.

До основних ускладнень в процесі експлуатації свердловин, крім того, належать [2] відкладення парафіну, відкладення смол і асфальтенів, винос піску з пласта, прорив води. Відкладення парафіну на стінках НКТ гирлової арматури призводить до зниження продуктивності свердловини. Унаслідок парафінізації внутрішніх стінок труб зменшується їх внутрішній перетин. Запафінювання поверхневих комунікацій призводить до подорожчання внутрішньопромислового перекачування нафти. Пісок роз'їдає труби й арматуру, частково осідає на забої, утворюючи піщані пробки. Наявність піску в продукції свердловин призводить до заклинювання установок ШГН і ЕЦН, призводить до передчасного зносу устаткування.

Зважаючи на значний вплив ускладнень при експлуатації свердловин на ефективність розробки нафтогазових родовищ впровадження методів нормалізації нафтогазовидобутку є актуальним завданням досліджень.

**Мета роботи:** розроблення конструкції дозувального струминного насоса для подачі хімічних реагентів в наземні технологічні трубопроводи.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні **завдання**:

- проаналізувати конструкції обладнання для дозованої подачі хімічних реагентів;
- обґрунтувати можливість застосування дозувальних струминних насосів;
- розробити конструкцію дозувального струминного насоса;
- розрахувати основні параметри роботи ежекційної системи;
- побудувати 3Д моделі елементів дозувального струминного насоса.

**Об'єкт дослідження:** дозувальний струминний насос.

**Предмет дослідження:** робочий процес дозувального струминного насоса.

**Методи дослідження:** систематизація досвіду практичного застосування свердловинних струминних насосів та особливості моделювання гідравлічних зв'язків між елементами ежекційної системи.

**Практична цінність:** розроблений розрахунковий алгоритм визначення основних параметрів робочого процесу дозувальних струминних насосів.

**Структура бакалаврської роботи.** Робота виконана у формі рукопису, складається з вступу, 5 розділів, висновків, викладених на 62 сторінках машинописного тексту, в тому числі 23 рисунки. Список використаної літератури включає 20 найменувань праць вітчизняних та зарубіжних авторів.

# 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДОЗОВАНОЇ ПОДАЧІ ХІМІЧНИХ РЕАГЕНТІВ

## 1.1 Застосування інгібіторів в нафтогазовій промисловості

На даний час однією з основних проблем у нафтогазовидобувній промисловості є [3] корозійне руйнування нафтопромислового обладнання, спричинене корозійно агресивними середовищами, зокрема високо обводненою нафтою та високо мінералізованими розсолами. Як відомо, високий вміст хлоридів, наявність агресивних газів (кисню, вуглекислого газу та сірководню) призводять до швидкого руйнування трубопроводів, якими транспортується пластова вода чи продукція. Причиною цього є утворення локальних корозійних дефектів матеріалу трубопроводів і виникнення поривів уже на ранній стадії експлуатації трубопроводу. Швидкість корозії в таких локальних зонах може сягати від 5 до 6 мм/рік, а в деяких випадках навіть 12 мм/рік. Тому постає питання усунення даного негативного явища з метою подовження терміну експлуатації нафтопромислового обладнання. На сьогоднішній день широко застосовується метод витіснення нафти водою, яка нагнітається в пласт (система підтримання пластового тиску). Для нагнітання використовується підтоварна вода, попередньо відділена з видобутої продукції, пластова вода з водозабірних свердловин і, що є досить небезпечно для експлуатації обладнання, прісна вода, яка в більшості випадків містить розчинений кисень. Наявність таких корозійно агресивних компонентів як кисень, діоксид вуглецю та сірководень призводить до виходу обладнання з ладу вже на ранніх етапах його експлуатації. Так, розчинений кисень спричиняє інтенсивну корозію металу, а саме: локальну корозію, яка призводить до поривів уже на 3–5 році експлуатації трубопроводів. Кисень також сприяє розвитку аеробних бактерій в пласті. Діоксид вуглецю знижує рН води і призводить до руйнування захисних оксидних плівок на поверхні внутрішньої стінки трубопроводу, зміни механізму корозії, а також до інтенсивного руйнування металу внаслідок переважаючої локальної корозії. Сірководень, взаємодіючи з залізом,

утворює тверді частинки сірчистого заліза, що виносяться потоком води, а при наявності кисню – сірчану кислоту, яка призводить до зростання агресивності води і, відповідно, до росту інтенсивності корозійних процесів. Стічні води можуть бути забруднені і сульфатвідновлюючими бактеріями, які викликають утворення сірководню. Одним з основних і дешевих методів захисту нафтопромислового обладнання від корозійного руйнування є застосування інгібіторів корозії – речовин або їх сумішей, які у невеликих концентраціях призводять до різкого сповільнення корозійних процесів. Введення в агресивне середовище незначної концентрації інгібітора (25 – 200 г/м<sup>3</sup> транспортуючого середовища) значно знижує швидкість корозійного руйнування металу.

Як відомо зі світової практики, у нафтогазовій галузі для попередження утворення кристалогідратів і руйнування вже утворених кристалогідратів як реагент застосовують метанол [4]. Зокрема, в Україні для цього використовують більше ніж 10 тис. т метанолу на рік. Разом з тим, що метанол є найбільш ефективним реагентом під час здійснення технології видобування природного газу, він характеризується високою токсичністю та пожежонебезпечністю. Значна його частина потрапляє у навколишнє середовище, що може мати негативні наслідки для флори та фауни. Незважаючи на те, що впродовж багатьох років ведеться пошук реагентів-замінників, серед яких виділяють гліколі, солі (дихлорид кальцію, дихлорид магнію), на сьогодні не знайдено повноцінного аналога метанолу у технологічних процесах видобування і підготовки природного газу.

Корозія – одна з найбільш значущих проблем галузі й вимагає комплексного підходу до її розв'язання. Розробки останніх років дозволили створити та організувати виробництво низки високоефективних і екологічно чистих інгібіторів парафіновідкладень, які дають можливість у 2 – 8 разів збільшити період роботи свердловин між очищенням вибою [5].

Видобуток води зростає [5] зі збільшенням загального відбирання газу й вуглеводневого конденсату. У воді, що вилучається із свердловин у розчиненому

стані, знаходяться вуглекислий газ, сірководень і органічні кислоти, які перетворюють воду на електроліт. Процес руйнування металу в такому випадку є електрохімічним, що пришвидшується з часом. Аналізи продукції свердловин на наявність агресивних газів коливається в широких межах: вуглекислого газу до 4,3 %, сірководню до 0,0004 %. При детальному вивченні механізму розвитку корозійних руйнувань насосно-компресорних труб (НКТ) газоконденсатних свердловин мікроскопічними дослідженнями було встановлено, що основним видом корозії при впливі продукції газоконденсатних свердловин із переважним умістом вуглекислоти є точкова корозія – один із найбільш небезпечних видів корозії. Розвиток точкової корозії в тілі труби має невизначений, такий, що постійно змінюється, напрям.

Особливості використання та властивості хімічних реагентів поширюють можливість їх застосування практично на всіх стадіях експлуатації нафтогазових свердловин (рисунок 1.1)

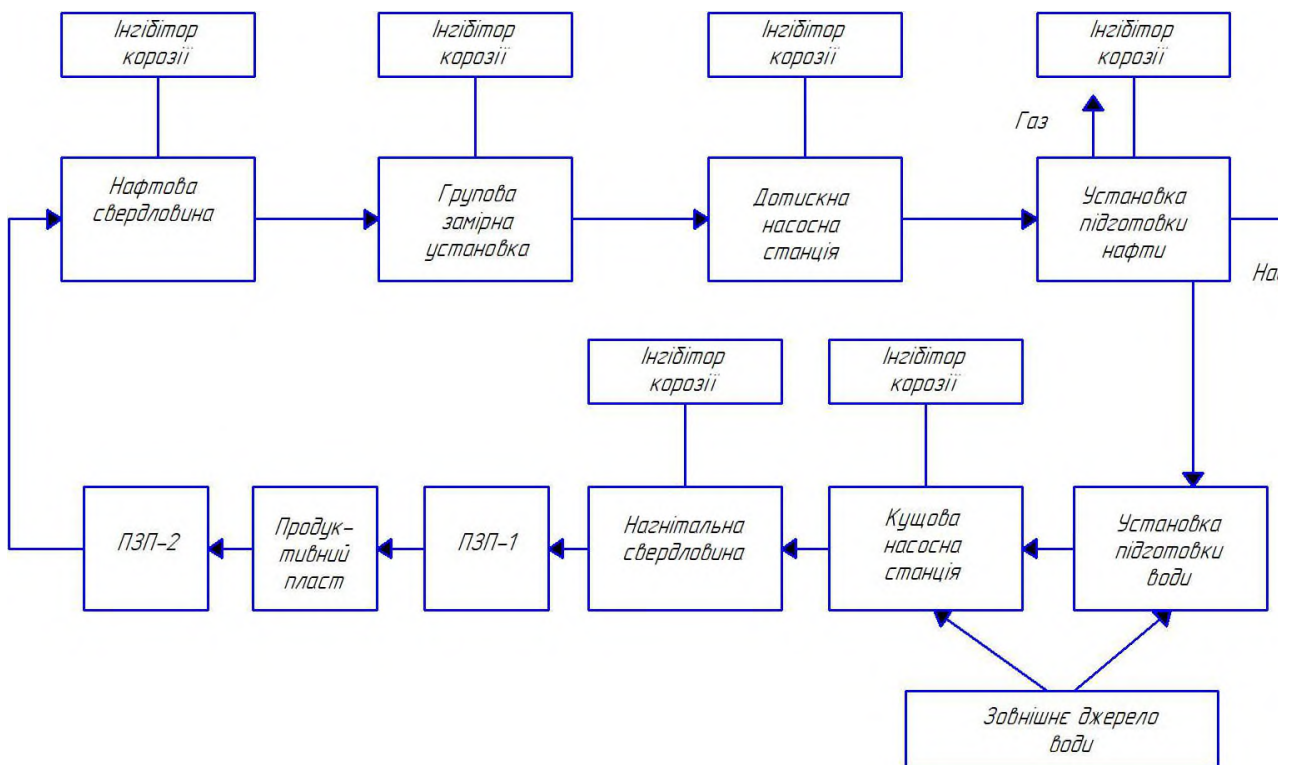


Рисунок 1.1 – Области застосування інгібіторів корозії

Для подачі інгібіторів в свердловину, зазвичай, застосовують спеціальні пересувні установки (рисунок 1.2). Основними елементами таких установок є резервуар з хімічними реагентами та насос. Дані елементи монтують на автомобільному шасі. Сьогодні розроблено типорозмірний ряд установок для подачі інгібітора в свердловину, які відрізняються типом транспортованих хімічних реагентів, місткістю резервуарів та іншими технічними характеристиками.



Рисунок 1.2 – Пересувні установки для подачі інгібітора  
Обладнання устя свердловини, яке застосовують для подачі в свердловину хімічних реагентів показане на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Обладнання устя для подачі хімічних реагентів в свердловину  
Особливості конструкції обладнання устя для подачі хімічних реагентів значною мірою залежать від умов експлуатації конкретної свердловини.

Одним із ускладнень, що негативно впливає на експлуатацію газових та газоконденсатних свердловин, є солеві відкладення [6]. Дані відкладення являють собою тверді непрхідні пробки, а також кіркоподібні нашарування і можуть відкладатися переважно на внутрішній поверхні ліфтових труб на різну довжину (до декількох десятків метрів) та товщину. Відкладення солей часто бувають дуже міцними та порушують стабільну експлуатацію свердловин, а також можуть призвести і до їх повної зупинки. Солевідкладення може відбуватися як у порах колектора привибійної зони, інтервалах перфорації, так і в експлуатаційних колонах, тощо. Солеві відкладення можуть мати у своєму складі карбонати кальцію, магнію, барію, стронцію, кальцієво-магнієві і залістї карбонати, сульфати кальцію, магнію, барію і стронцію, двооксид кремнію, хлористий натрій і калій, гідроксид магнію, оксиди і гідроксиди заліза, органічні речовини та продукти корозії металоконструкцій та інші [6].

У світовій практиці [6] використовують багато різних способів усунення солевідкладення. За технологією застосування їх можна поділити на дві групи. До першої слід віднести способи запобігання солевідкладення до початку їх утворення, а до другої безпосередньо при їх відкладенні. Отже, розглянемо нижче способи запобігання та боротьби з солевідкладеннями, що використовуються.

Для запобігання солевідкладення використовують такі способи [6]:

- постійне подавання інгібітора по існуючих інгібіторопроводах у затрубний простір свердловин з установки підготовки газу за допомогою насосів [6];
- постійне подавання інгібітора в затрубний простір свердловини або шлейф за допомогою стандартної дозуючої установки, яка розміщена на усті [6];
- періодичне подавання інгібітора в затрубний простір свердловини за допомогою пересувного насосного агрегата [6];
- періодичне закачування інгібітора по НКТ і протискування у привибійну зону пласта, де він адсорбується і утримується на поверхні породи. У процесі

фільтрації рідини через ПЗП відбувається поступовий процес десорбції, інгібітор вивільняється і з пластової рідиною надходить у свердловину, забезпечуючи попередження відкладення солей [6];

– періодичне закачування прісної та гарячої води (попередньо очищеної та допустимої по хімічному складу за результатами аналізу на вміст солей, щоб виключити додаткові фактори, які сприятимуть процесу солевідкладення) [6];

– захисні покриття НКТ (скло, емалі, різні лаки, епоксидна смола); покриття наноситься методом напилення або електроосадження, виготовляють із спеціального матеріалу. Слід зазначити, що покриття НКТ не попереджає повністю відкладення солей, але знижує інтенсивність росту їх утворення, тому рекомендується використовувати на свердловинах з помірною інтенсивністю солевідкладення;

– періодичне подавання по НКТ на вибій свердловини інгібіторів солевідкладення у твердому вигляді (гранули, капсули). Наприклад, інгібітор солевідкладення CAPTRON 75 W у вигляді капсул [6];

– промивка внутрішньої поверхні колони НКТ із використанням колтюбінгової установки та азотної компресорної установки. Цю технологію застосовували на свердловинах Східно-Полтавського ГКР та інших родовищах ГПУ «Полтавагазвидобування», яка дозволяє виконувати промивку внутрішньої поверхні ліфтової колони труб від солевих відкладів без демонтажу фонтанної арматури та глушіння свердловини шляхом спуску безмуфтових довгомірних труб (БДТ) у НКТ та подачі аерованої рідини (розчин ПАР 1–3 % із азотом) зі створенням прямої циркуляції [6].

Доцільним є застосування комбінації різних способів, тобто використання періодично, наприклад один раз у тиждень інгібітора солевідкладення для карбонату кальцію і відповідно, один раз у місяць розчина оцтової кислоти. Необхідно зазначити, що використання розчинів кислот може сприяти процесу корозії свердловинного обладнання. Тому при їх використанні доцільно застосовувати

інгібіторний захист, наприклад періодичне закачування розчину інгібітора корозії [6].

На практиці [6] на промислах ПАТ "Укргазвидобування" для забезпечення стабільної роботи газових та газоконденсатних свердловин і попередження відкладень солей застосовують профілактичні заходи, тобто здійснюють закачування рідини на усті такими способами:

- закачують у затрубний простір свердловини прісну воду при її роботі на установку підготовки газу [6];
- закачують у трубний простір свердловини прісну воду та здійснюють її пуск у роботу затрубним простором на установку підготовки газу [6];
- закачують у затрубний простір свердловини прісну воду з подальшим продуванням трубного простору на амбар [6];
- закачують у затрубний простір свердловини розчину ПАР низької концентрації (до 0,1 - 0,5 %) при її роботі на установку підготовки газу. Це дозволяє зменшити імовірність з'єднання солей і глинистого матеріалу та утворення міцної пробки [6];
- закачують у затрубний простір свердловини гарячу воду з подальшим продуванням трубного простору на амбар [6];
- закачують у трубний або затрубний простір свердловини розчин інгібітора солевідкладення та в подальшому пускають в роботу на установку підготовки газу [6];
- закачують у трубний та затрубний простір свердловини розчин інгібітора солевідкладення із зупинкою її та подальшим пуском в роботу [6].

На сьогоднішній день на багатьох родовищах ГПУ "Шебелинкагазвидобування" для попередження солевідкладення галіту часто використовують закачування прісної води. Даний спосіб використовують для покриття дефіциту вологи у газі, а не для розчинення солевих відкладень. Для виконання даного заходу використовують автоцистерну для доставлення безпосередньо на устя прісної води

та цементувальний агрегат, наприклад (ЦА-320) за допомогою якого здійснюється закачування [6].

## **1.2 Основні схеми дозувальних насосів**

Дозувальні насоси – це обладнання, що забезпечує точну подачу певної кількості робочого середовища. Вони дозують рідину, але є також моделі, які можуть регулювати швидкість потоку відповідно до поставленого завдання [7].

### *Дозувальний насос: пристрій і сфери його застосування*

Дозувальні насоси широко використовують у найрізноманітніших галузях [7]. Наприклад, вони можуть застосовуватися в хімічній, харчовій, фармацевтичній, медичній та багатьох інших сферах. Насоси цього виду можуть дозувати різні [7]:

- речовини;
- хімічні речовини;
- кислоти;
- луги;
- емульгатори;
- загусники;
- пластифікатори;
- барвники;
- консерванти та багато інших.

З огляду на принцип роботи [7] дозувального насоса, таке обладнання часто використовується для очищення і підготовки води. Воно бездоганно справляється з порційною подачею коагулянтів і хлору. Застосовувані для цього завдання насоси можуть оснащуватися давачами RedOx або рН, а також вимірювачами концентрації хлору.

### *Дозувальний насос: принцип роботи обладнання*

Дозувальні моделі належать [7] до класу об'ємних насосів, оснащених електроприводом або механічним мотор-приводом. Пристрій і принцип дії

дозувальних насосів роблять їх незамінним інструментом, якщо потрібне точне й економічне дозування різних речовин.

За типом робочого елемента насоси діляться на мембранні (діафрагмові) і плунжерні (поршневі) та перистальтичні [7] (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Основні типи дозувальних насосів: плунжерні (а), мембранні (б) та перистальтичні (в)

#### *Мембранні дозувальні насоси*

Обладнання складається з таких компонентів [7]:

- робочої камери, всередині якої розташована еластична діафрагма;
- штока зі спеціальним якорем із металу;
- соленоїдної котушки або мотор-приводу;
- напрямних клапанів;
- пружини, що відповідає за повернення штока.

Приводом насоса є [7] соленоїдна електромагнітна котушка або трифазний мотор-привід з редуктором, а робочим елементом – мембрана. Принцип дії електромагнітного насоса полягає в наступному. На соленоїдну котушку подається живлення. Завдяки цьому утворюється магнітне поле, що висуває шток із мембраною вперед. Шток переміщається в цьому напрямку, вигинаючи мембрану всередину камери. За рахунок цього діафрагма витісняє певну кількість робочого середовища. Коли магнітне поле пропадає, шток повертається на своє місце

завдяки дії пружини. Разом із собою він витягує і мембрану. Через це в робочій камері виникає розрідження, завдяки якому в неї засмоктується нова порція рідини. Дозувальні насоси також називають соленоїдними або електромагнітними, бо шток рухається саме завдяки магнітному полю, що виникає в котушці. Якщо ж у ролі приводу виступає мотор-привід із редуктором, то таке обладнання називають мембранними дозувальними насосами. Завдяки принципу дії дозувальних насосів, обладнання може з легкістю працювати на холостому ходу (за відсутності рідини в системі).

#### *Плунжерні дозувальні насоси*

Це устаткування призначене для [7] порційної подачі великої кількості робочого середовища під тиском (рисунок 1.5). Часто використовується під час роботи з хімічно агресивними рідинами. Такі насоси також називаються поршневыми, тому що принцип їхньої дії заснований на рухах поршня (плунжера). Якщо всередині камери виникає підвищений тиск, рідина виштовхується, а якщо знижений – втягується. З огляду на принцип роботи дозувальних насосів (плунжерних), основними їхніми перевагами є [7]:



Рисунок 1.5 – Плунжерні дозувальні насосні агрегати: а) виконавчий робочий орган типу НД; б) виконавчий робочий орган типу М8Л; в) насос з безклапанною системою розподілу рідини

– високий рівень робочого тиску;

- можливість роботи з в'язкими рідинами;
- хороша точність дозування. Це досягається за рахунок відсутності зміни витрати, якщо змінюється протитиск у точці дозування.

#### *Типи приводу в дозувальних насосах*

У обладнання можуть відрізнятися типи приводу [7]. Існують варіанти з електромагнітним (соленоїдним) і електромеханічним приводом з мотор-редуктором. Кожен із них має свої конструктивні відмінності та особливості, тому розглянемо їх детальніше.

Електромагнітний (соленоїдний) привід [7]. Застосовується в насосах-дозаторах, які не призначені для роботи з великими обсягами рідини, але мають високу точність дозування. У сучасних моделях подача середовища може становити від кількох десятків мілілітрів на годину. Це досягається завдяки тому, що приводом є соленоїд – це електромагнітна котушка, усередині якої розташовано сердечник, що вільно рухається. Принцип роботи дозувальних насосів заснований на тому, що електричний імпульс подається до обмотки котушки. У цей момент сердечник виштовхується з неї завдяки магнітному полю, що виникає. Потім сердечник впливає на центральну частину мембрани – це змушує її вигинатися всередину камери. Коли живлення котушки вимикається, поворотна пружина повертає діафрагму і сердечник у вихідне положення. Об'єм рідини, що проходить через дозувальний насос, залежить від кількості і частоти електричних імпульсів, а також діаметра мембрани і розміру робочої камери. У деяких моделях обладнання передбачена можливість зміни довжини ходу сердечника: що він коротший, то меншою, але точнішою буде подача рідини. У виробника SEKO такі моделі є в серіях TEKNA EVO, MAXIMA EVO, ТЕКВА, КОМБА, INVIKTA і КОМПАСТ.

Електромеханічний привід із мотор-редуктором. Мембранні та плунжерні дозувальні насоси з таким [7] приводом можуть подавати рідину, об'єм якої вимірюється в сотнях літрів на годину. З конструктивної точки зору обладнання

оснащене штовхачем, сполученим із центральною частиною діафрагми. Принцип роботи дозувального насоса передбачає, що тиск на штовхач виникає завдяки дії ексцентрика. Роль силового механізму виконує електричний двигун. За зворотний рух робочого елемента відповідає пружина. Хід штовхача в дозувальних насосах із цим приводом може регулюватися. Це дає змогу змінювати подачу рідини, але з меншою точністю (бо загальні об'єми рідини досить великі). Продуктивність такого обладнання залежить від різних чинників [7]:

- об'єму робочої камери;
- робочої частоти редуктора;
- потужності електроприводу.

Як працює дозуючий насос [7]. Принцип роботи дозувального насоса дуже простий. Він включає два цикли:

1. Впуску. Поршень або мембрана рухається, збільшуючи об'єм робочої камери і створюючи в ній розрідження. Одночасно з цим відкривається впускний клапан, а випускний – закривається. У цей момент всередину камери надходить деяка кількість робочого середовища [7].

2. Випуску. Поршень або мембрана рухається у зворотному напрямку, підвищуючи тиск усередині камери. Випускний клапан відкривається, а впускний – закривається. Завдяки цьому процесу з камери видавлюється деяка частина рідини [7].

#### *Основні вимоги до дозувальних насосів*

Насоси-дозатори [7] мають відповідати низці певних технічних вимог. Це зумовлено завданнями, для яких використовуються дозувальні насоси: принцип дії обладнання заснований на подачі потрібного обсягу рідини в загальну напірну лінію. Тобто воно встановлюється переважно в системах, в яких потрібна висока точність роботи всіх компонентів. Залежно від сфери застосування, обладнання має ефективно справлятися з порційною подачею різних типів рідини (залежить від сфери застосування). При цьому не повинно відбуватися втрати

працездатності. Мова йде про токсичні склади, розчини, які можуть викликати корозію, абразивні середовища, рідини з твердими частинками. Оскільки працює дозувальний насос із високим тиском, підбирати потрібно модель, яка без проблем витримує подібні умови роботи. Обладнання повинно виконувати поставлені завдання без зниження продуктивності. Насоси-дозатори повинні володіти широким переліком налаштувань і мати великий вибір щодо своїх конструктивних особливостей. Зокрема, це [7]:

- розмір;
- продуктивність;
- типи робочого елемента;
- виконання зворотних клапанів;
- типи приводу, що відповідають за рух робочого елемента;
- способи регулювання довжини ходу;
- матеріали робочої камери;
- функціональні можливості та налаштування обладнання.

#### *Особливості роботи дозувальних насосів*

Залежно від моделі [7] насоса-дозатора, витрату обладнання можна регулювати за рахунок зміни:

- довжини ходу плунжера або мембрани. Регулювання виконується за допомогою мікрометричного гвинта або за допомогою механічних дільників;
- частоти робочих циклів. Щоб змінити число ходів робочого елемента, в блоці управління обладнанням виставляють відповідні налаштування.

Як правило, дозувальні [7] насоси мають у конструкції спеціальний запобіжний клапан, а також пристрій, що відповідає за викид повітря з робочої камери. З огляду на будову і принцип роботи дозувальних насосів, у більшості випадків користувач може автоматизувати процес подачі рідини. Це стало можливим, тому що багато сучасних моделей мають спеціальні контролери

управління. З їхньою допомогою можна змінювати подачу робочого середовища, а також регулювати її відповідно до електричних сигналів від додаткових приладів.

В комплект дозувального насоса входять також стандартні вузли та блоки (рисунок 1.6)

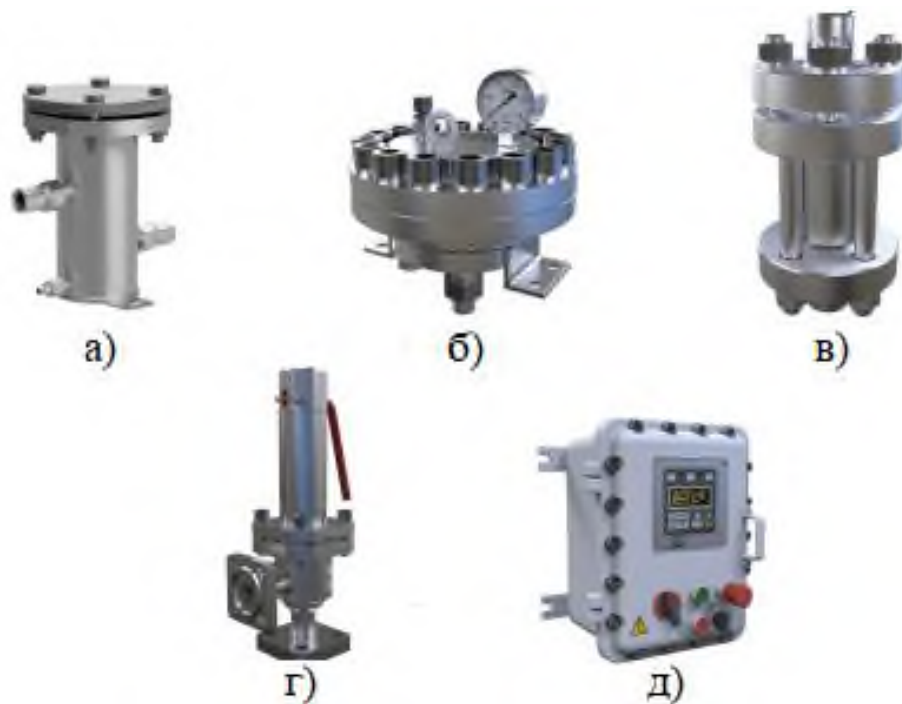


Рисунок 1.6 – Стандартні вузли та блоки дозувальних насосів а) фільтрувальні вузли; б) пристрої для накопичення енергії; в) регулювальна арматура; г) запобіжна апаратура; д) апаратура контролю та керування

Основні правила вибору дозувальних насосів. Щоб правильно підібрати обладнання [7], потрібно звернути увагу на низку характеристик, від яких залежать можливості дозувального насоса. Наприклад, слід враховувати матеріал виготовлення:

- робочої камери. Вона може виконуватися з кислотостійкої сталі, полівінілхлориду, поліетилену або фторопласту;
- плунжера. Зазвичай виготовляється з кераміки або кислотостійкої сталі;

– мембрани. Найчастіше виготовляється з фторопласту, але потрібно переконатися, що така діафрагма підходить для передбачуваних умов експлуатації обладнання.

На особливу увагу заслуговує потужність дозувального насоса [7]. Якщо вона недостатня, тоді при надмірному навантаженні обладнання може зламатися або почне працювати на знос. Надто потужний насос-дозатор теж не слід обирати, бо це тягне за собою необґрунтовану витрату коштів.

### **1.3 Основні схеми технологічних блоків для подавання реагентів**

Блочна система використання обладнання для закачування хімічних реагентів в свердловину, зазвичай, складається з платформи, на якій розміщені основні вузли дозувальних систем, систем управління, контролю та дозування хімічних реагентів (рисунок (1.7)). При виготовленні обладнання у мобільному виконанні воно може розміщатись на пересувних платформах. Конструкція, структура та характеристики обладнання для закачування хімічних реагентів в свердловину значною мірою залежать від призначення, технологічного процесу, що реалізується та діючих експлуатаційних факторів. Безпосереднє закачування хімічних реагентів в свердловину, зазвичай, здійснюється за допомогою об'ємних насосів з електричним приводом.

До складу обладнання для закачування хімічних реагентів в свердловину входять додаткові вузли та агрегати призначені для очищення реагентів, зменшення коливань гідродинамічних параметрів потоків, що спрямовуються в затрубний простір, колону підйомних труб або технологічні трубопроводи, запобігання аварійного підвищення тиску в елементах обладнання або руху закачуваних рідин у зворотному напрямку. Система гідравлічних ліній, що з'єднують елементи дозувального обладнання, повинна містити необхідну кількість запірної та регулювальної арматури. Для контролю параметрів технологічних процесів обладнання для закачування хімічних реагентів в свердловину оснащують датчиками рівня, тиску, витрати, температури, частоти ходів плунжера об'ємних

насосів, манометрами, вакууметрами, мановакууметрами та іншими контрольними пристроями.

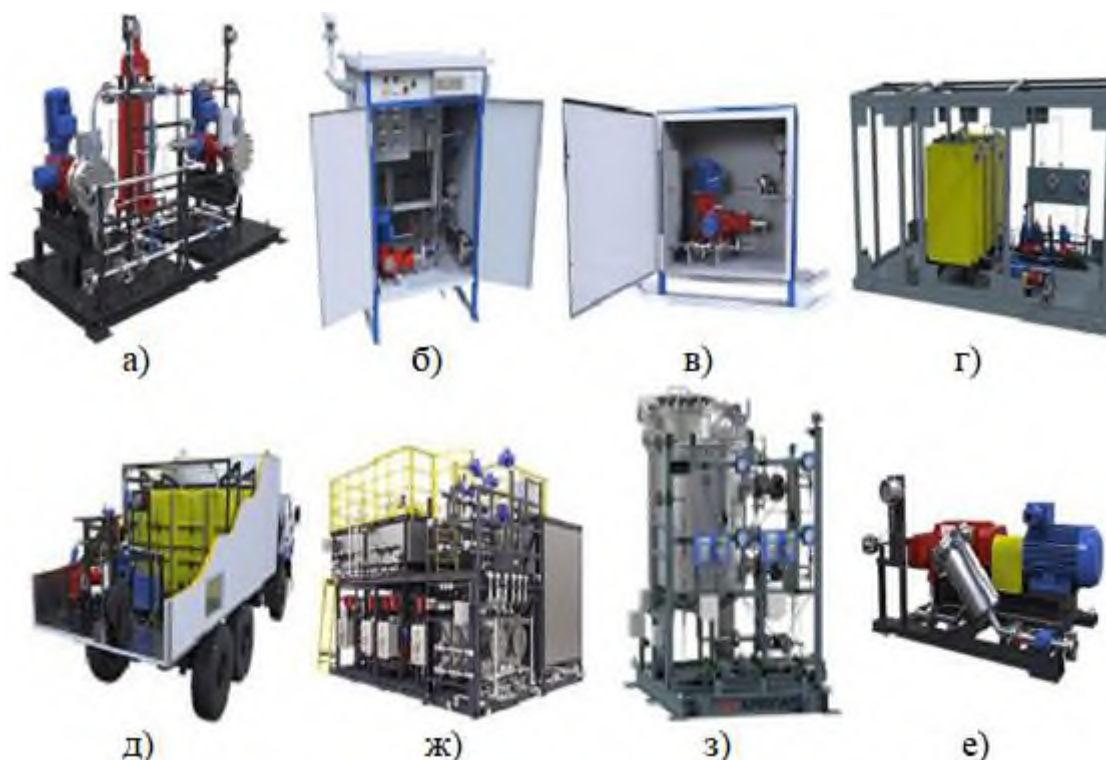


Рисунок 1.7 – Блочна система використання обладнання для закачування хімічних реагентів в свердловину: а) схема розміщення обладнання; б), в) наземне обладнання для дозування інгібіторів; г) обладнання для розміщення хімічних реагентів; д) розміщення обладнання на пересувній платформі; ж) обладнання для подачі реагентів в свердловинах прибережного шельфу; з) обладнання для одоризації газоподібних вуглеводнів; е) обладнання для подачі інгібітора для попередження утворення гідратів

На рисунку 1.8 показаний зовнішній вигляд установки насосної блокової УНБ виробництва Харківського насосного заводу [8]. Установки мобільні блокові насосні дозувальні УМБО призначені для об'ємного напірного дозування та перекачування нейтральних та агресивних рідин з температурою від мінус 60°С до плюс 200° у системах збирання, підготовки та транспортування нафти, газу, реагентів, води тощо.

Визначимо сферу використання насосів даного типу.

*Області застосування [8]:*

- дозування деемульгаторів;
- дозування інгібіторів парафіно-солевідкладень;
- дозування метанолу та сумішей;
- дозування інгібіторів корозії та гідратоутворень;
- дозування поглиначів сірководню;
- дозування антитурбулентних присадок у трубопроводі;
- дозування кислот та лугів при водопідготовці;
- дозування фосфатів, аміаку, гідразин-гідрату, хеламіну;
- перекачування ЗВГ, газового конденсату, етиленгліколів і т.д.;
- гідравлічні випробування.



Рисунок 1.8 – Установа насосна блокова УНБ виробництва Харківського насосного заводу [8]

*Комплектація [8]:*

Склад установки блокової визначається відповідно до вимог та норм технологічного процесу на об'єкті замовника, може включати [8]:

- агрегат дозувальний плунжерний НД або мембранний НДР-2М;
- насос відцентровий самовсмоктувальний;

- місткість;
- електро-контактний манометр для відключення насоса дозувального НД при підвищенні тиску до наддопустимого рівня;
- трубопровідну обв'язку та запірно-регулюючу арматуру, що забезпечує функціонування установки.

Можлива комплектація запобіжним (перепускним) клапаном для захисту насоса-дозатора НД та нагнітальної лінії від вище допустимого тиску [8]. Можлива комплектація датчиком тиску та виконавчим пристроєм, що відключає дозуючий насос НД, при перевищенні тиску вище встановленого, кнопковим постом для пуску – зупинки насосів НД та відцентрового насоса; шафою електричною з розміщеною в ньому пускозахисною апаратурою. Все обладнання має вибухозахищене виконання.

*Переваги [8]:*

Установки УМБО виробництва ТОВ «Харківський насосний завод» формуються на базі українських електронасосних агрегатів плунжерних НД або мембранних насосів НДР-2М та допоможуть [8]:

- знизити витрати на проектно-дослідні та будівельно-монтажні роботи;
- у максимально короткий термін провести будівництво чи реконструкцію об'єкта, отримавши обладнання на майданчик будівництва у максимальній заводській готовності зі змонтованими технологічними вузлами;
- скоротити витрати часу на підбір обладнання та приладів КВП.

Установка УМБО [8] може бути змонтована на рамі, оснащій стропувальними елементами, що дозволяє вантажити та переміщати її автомобільним транспортом. Габаритні розміри надсилаються після узгодження технічних характеристик обладнання та варіантів його розміщення відповідно до завдання на проектування.

Установка УНБАО [9] призначена для перекачування та/або подачі у свердловини СПВ (супутньо-пластової води), а також для інших продуктів в'язкістю

0,0085 до 8 см/с та температурою не більш 40 град С. Вміст щільних неабразивних частинок у рідині, що перекачується не повинен перевищувати 0,2 % по масі, допускаються розміри не більше 0,2 мм. Щільність частинок трохи більше 1300 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 1.9).



а)



б)

в)

Рисунок 1.9 – Установка насосна блокова автоматизована УНБА-О-6,3-6,3-У4:

а) зовнішній вигляд; б) насос; в) блок управління [9]

Принцип роботи установки насосної блокової для накачування пластової води полягає в тому, що вода відокремлена від газу на попередніх стадіях підготовки, очищується від механічних домішок і під високим тиском подається у свердловину. Для створення тиску використовуються насосні агрегати, які можуть бути розміщені як на відкритій площі-виконання УХЛ1, так і під навісом – виконання УХЛ2, або в середині блочної станції – УХЛ3, УХЛ4 відповідно [9].

Насосні станції можуть [9] бути блоковими або модульними. В залежності від умов експлуатації, виду перекачуваної рідини, УНБ виготовляється у загальнопромисловому або вибухозахищеному виконанні.

Основні параметри установки насосної блокової УНБАО 6,3-6,3 [9]:

- типорозмір основного агрегату – 2,3 ПТ 6,3/6,3;
- кількість робочих агрегатів – 1 шт;
- кількість резервних агрегатів – 1 шт;
- сумарна подача установки – 6,3 м<sup>3</sup>/год;
- робочий тиск на виході установки – 6,3 МПа;
- максимальна потужність споживана установкою, не більше 39 кВт;
- вага – не більше 3500 кг.

УНБ складається з наступних компонентів [9]:

- блок очищення води;
- блок насосний;
- блок електроживлення та автоматики (шафа управління, витратомір та інше).

Блок насосів УНБ комплектується триплунжерними насосними агрегатами з електричним приводом [9].

Переваги установки насосної блокової УНБАО [9]:

- висока продуктивність, надійність та довговічність;
- гарантія від виробника 12 місяців;
- компактність та мобільність, установка легко транспортується та встановлюється на місці експлуатації;
- відсутність витрат на проектно-дослідні та будівельно-монтажні роботи.

Конкретна комплектація та характеристики блокової насосної установки можуть змінюватись в залежності від умов експлуатації [9].

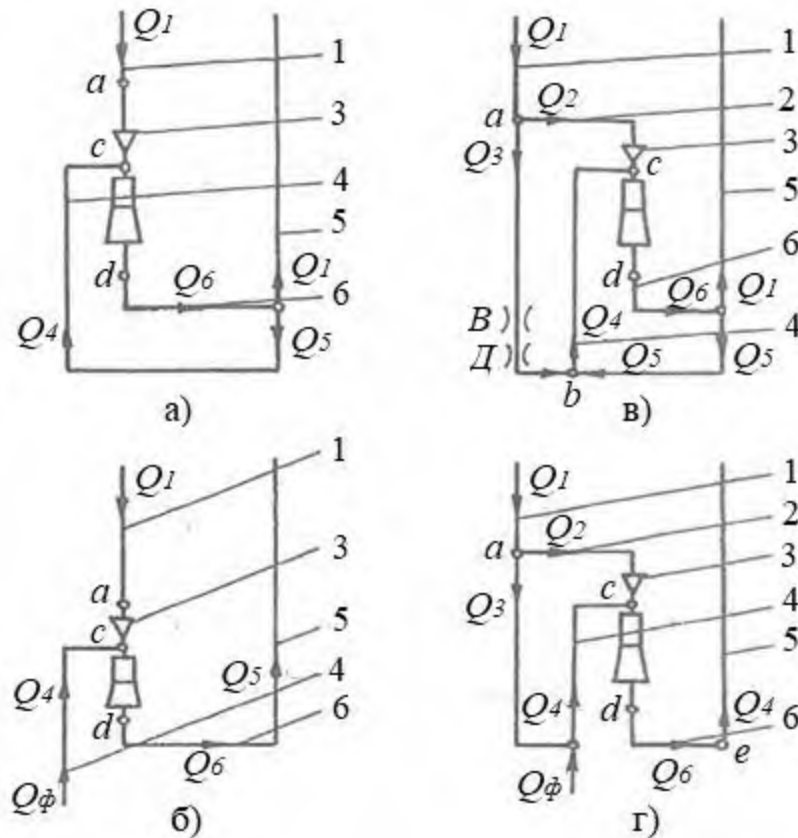
## 2 ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ДОЗУВАЛЬНИХ СТРУМИННИХ НАСОСІВ

### 2.1 Аналіз особливостей робочого процесу свердловинного струминного насоса

Свердловинні струминні апарати досить широко використовують у багатьох процесах, пов'язаних з бурінням та експлуатацією свердловин, зокрема для очищення вибою, в разі зниження диференціального тиску на пласт, виклику припливу з продуктивного горизонту та під час застосування деяких спеціальних технологій [10]. Попереднє визначення режиму роботи струминного апарата дає можливість підвищити ефективність його використання за рахунок роботи в оптимальному робочому діапазоні. Характеристики струминного апарата можна визначити аналітично на основі розробки математичної моделі його робочого процесу.

Схеми розміщення струминного апарата [10] можна звести до двох основних груп: схеми з послідовним і паралельним включенням насоса в систему циркуляції свердловини (рисунок 2.1). В разі використання послідовної схеми розміщення струминного апарата весь потік рідини, що надходить від поверхневого насоса, прямує через робочу насадку. За умови паралельного розміщення потік, що надходить від поверхневого насоса, ділиться на дві частини: перша прямує на робочу насадку, а друга – безпосередньо на вибій свердловини. Названі основні групи включення струминного апарата в свою чергу можуть мати додатковий поділ за ознакою наявності чи відсутності додаткового гідравлічного зв'язку всмоктувальної і напірної ліній. На практиці ця ознака передбачає використання в системі циркуляції свердловини пакеруючих пристроїв. Так, якщо нижче струминного апарата розміщено пакер, то всмоктувальна і напірна лінії безпосередньо не зв'язані, на відміну від схеми включення без пакера, коли такий зв'язок існує. Прикладом використання послідовної схеми (рисунок 2.1, а) є конструкція гідравлічного вловлювача, призначеного для очищення вибою свердловини.

Схему, показану на рисунку 2.1, в застосовують у компоновках, призначених для інтенсифікації процесу буріння свердловин. Схеми включення струминних апаратів при наявності пакеруючих пристроїв використовують у процесах освоєння та експлуатації свердловин [10].



1 – бурильна колона; 2 – відвід потоку на робочу насадку; 3 – робоча насадку; 4 – всмоктувальна (інжекційна) лінія; 5 – канал затрубного простору; 6 – вихідна лінія струминного апарата; В – вібратор; Д – долото

Рисунок 2.1 – Розміщення струминного апарата в свердловині послідовне без пакера (а) та з пакером (б) і паралельне без пакера (в) та з пакером (г) [10]

Наведені схеми – основні і від них можна створювати численні модифікації. Розрахункові схеми струминного апарата можуть ускладнюватись при наявності в свердловині процесу поглинання рідини або флюїдопроявів [10]. У разі послідовної схеми включення струминного апарата (рисунок 2.1, а) робочий потік з витратою  $Q_1$  по колоні бурильних труб 1 подається на робочу насадку 3 струминного апарата. У приймальній камері робочий потік змішується з

інжектованим і через камеру змішування з дифузором надходить у кільцевий канал затрубного простору 5. Після виходу в затрубний простір частина потоку з витратою  $Q_5$  прямує до вибою і створює місцеву зворотну привибійну промивку, а частина потоку з витратою  $Q_1$  формує спрямований вгору потік рідини. Інжектований потік з витратою  $Q_4$  надходить у приймальну камеру струминного апарата по всмоктувальній лінії 4.

Якщо струминний апарат має паралельну схему включення [10], рідина підводиться по бурильній колоні з витратою  $Q_1$  (рисунок 2.1, в). У точці  $a$  потік  $Q_1$  розділяється. Менша його частина по каналу 2 подається на робочу насадку 3 апарата, який під'єднано до центрального каналу 1 паралельно. Більша частина потоку продовжує рухатись до вибою, проходить вібратор  $B$  (якщо він використовується в спільній з струминним апаратом компоновці) і виходить у затрубний простір. У привибійній зоні потік розділяється повторно в точці  $b$ , після чого частина його надходить у всмоктувальну лінію 4 і в приймальну камеру струминного апарата. Залежно від характеристик струминного апарата і співвідношення гідравлічних втрат в елементах системи циркуляції значення витрати потоку  $Q_4$  може бути меншим, а може і перевищувати значення витрати потоку  $Q_3$ , що надходить до вибою. Якщо  $Q_4 < Q_3$ , то частина потоку, який надходить з вибою, піднімається кільцевим каналом 5, створеним стінками свердловини і корпусом компоновки. Якщо  $Q_4 > Q_3$ , в кільцевому каналі 5 рідина рухається у зворотному напрямі, тобто створюється місцева привибійна зворотна промивка свердловини.

У точці  $c$  (змішувальна камера) [10] потоки  $Q_2$  і  $Q_4$  з'єднуються, після чого загальний потік  $Q_6$  через дифузор струминного апарата виходить у вихідну лінію 6. У точці  $e$  потік, створений струминним апаратом, виходить у кільцевий канал 5. Залежно від напрямку циркуляції в кільцевому каналі в точці  $e$  потоки розділяються або з'єднуються. Коли поглинання бурового розчину і флюїдопрояви відсутні, витрати потоку на виході із свердловини дорівнюють продуктивності поверхневого насоса. Таким чином, при паралельному під'єднанні струминного

апарата гідравлічна система пристрою складається з двох суміжних контурів, окремі ланки яких можуть містити гідравлічні опори різного типу.

Якщо нижче від струминного апарата з послідовною схемою включення [10] розмістити пакер, насос може працювати в двох режимах. При наявності флюїдопроявів весь потік, що надходить з пласта, рухається по всмоктувальній лінії 4 (рисунок 2.1,б). У цьому випадку витрати потоку в вихідній лінії струминного апарата визначаються сумарною витратою потоків  $Q_l$  і  $Q_4$ . Для схеми, наведеної на рисунку 2.1, виконуються співвідношення  $Q_4=Q_\phi$  і  $Q_6=Q_5$ , а продуктивність поверхневого насоса менша, ніж витрати потоку, що надходять до устя свердловини по затрубному простору. Якщо флюїдопрояви у свердловині відсутні, тобто  $Q_\phi=0$ , то витрати потоку у всмоктувальній лінії дорівнюють нулю, а витрати потоку в затрубному просторі визначаються продуктивністю поверхневого насоса. За умови паралельного під'єднання струминного апарата з розміщеним нижче пакером весь потік, що надходить на вибій  $Q_3$  прямує по всмоктувальній лінії до приймальної камери насоса. Якщо в свердловині мають місце флюїдопрояви ( $Q_\phi \neq 0$ ), рідина, яка надходить з пласта, змішується з потоком  $Q_3$  і разом з ним рухається по всмоктувальній лінії струминного насоса. У цьому випадку витрата потоку в затрубному просторі  $Q_5$  перевищує продуктивність поверхневого насоса  $Q_l$  на величину витрати пластового флюїду.

Витрати спрямованого вгору потоку визначаються [10] характеристиками струминного апарата і гідравлічної системи, в якій він працює. Робочий процес струминного апарата визначається залежністю, яку можна отримати з використанням закону збереження кількості руху рідини між характерними перерізами насоса [10]

$$h = \varphi_1^2 \frac{f_p}{f_3} \left[ 2\varphi_1 + \left( 2\varphi_2 - \frac{1}{\varphi_4^2} \right) \frac{f_p \cdot \rho_p}{f_1 \cdot \rho_1} i^2 - \left( 2 - \varphi_3^2 \right) \frac{f_p \cdot \rho_p}{f_3 \cdot \rho_3} (1+i)^2 \right]; \quad (2.1)$$

$$h = \frac{\Delta P_3}{\Delta P_p} = \frac{P_3 - P_i}{P_p - P_i}; \quad (2.2)$$

$$i = \frac{Q_i}{Q_p}, \quad (2.3)$$

де  $h$  – відносний напір струминного апарата;

$f_p, f_i, f_3$  – відповідно площі робочого, інжектowanego і змішаного потоків;

$\rho_p, \rho_i, \rho_3$  – відповідно густина робочого, інжектowanego і змішаного потоків;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – коефіцієнти швидкостей в характерних перерізах проточної частини струминного апарата;

$i$  – коефіцієнт інжекції;

$\Delta P_p$  – різниця тисків змішаного і робочого потоків;

$\Delta P_3$  – різниця тисків змішаного і інжектowanego потоків;

$P_p, P_i, P_3$  – значення статичних тисків відповідно робочого, інжектowanego і змішаного потоків;

$Q_p, Q_i$  – витрати робочого і інжектowanego потоків [10].

Характеристика гідравлічної системи, в якій працює струминний апарат, визначається втратами тиску в системі циркуляції свердловини. Аналіз наведених схем гідравлічної системи циркуляції і особливостей розподілу витрат рідини в її ланках свідчить про необхідність використання для розробки математичної моделі роботи вибійних компоновок положень теорії струминного апарата і послідовності виконання розрахунків складних трубопроводів багатоконтурних мереж [10].

Задачі розрахунку багатоконтурних кільцевих гідравлічних мереж можна розв'язувати аналітичним методом послідовних наближень або з використанням методу електроаналогій [10]. Метод електроаналогій пов'язаний з обов'язковим виконанням умов, які аналогічні вимогам до розрахунку електричних мереж. Визначення повних втрат тиску для кожного контуру циркуляції базується на використанні принципу суперпозиції, згідно з яким загальні втрати тиску дорівнюють втратам на тертя і втратам в зосереджених місцевих опорах. Розрахунок робочих характеристик струминного апарата згідно з виразами (2.1) – (2.3) передбачає

попереднє визначення статичних тисків, що характеризують гідравлічну систему, в якій працює насос. Значення тисків, які входять до виразу (2.2), визначаються розрахунком гідравлічних втрат у системі циркуляції свердловини. В разі паралельного під'єднання струминного апарата послідовність розрахунку ускладнюється внаслідок наявності додаткової невідомої величини, оскільки в цьому випадку через робочу насадку проходить лише частина потоку, що його подає поверхневий насос. Додаткову невідому величину можна визначити після розрахунку розподілу витрат потоку у ланках замкнутого контуру, складаючи рівняння балансу потоків у замкнутому контурі *авса* і рівняння балансу витрат для вузлової точки *a* [10]

$$\begin{aligned} \alpha_2 Q_2^2 + \alpha_3 Q_3^2 + \alpha_4 Q_4^2 &= 0 \\ Q_1 - Q_2 - Q_3 &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

де  $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  – коефіцієнти, що визначають конструкційні та гідравлічні властивості каналів гідравлічної системи (рисунок 2.1, в);

$Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  – витрати рідини у відповідних ланках гідравлічної системи.

Розглянемо послідовну схему включення (рисунок 2.1, а) струминного апарата, коли мають місце флюїдопрояви пластової рідини. У цьому випадку витрати інжектваного потоку  $Q_4$  дорівнюють [10]

$$Q_4 = Q_5 + Q_\phi \quad (2.5)$$

Нову невідому величину визначаємо, складаючи додаткове рівняння – рівняння балансу напорів у ланцюгах кільцевого замкнутого контуру у [10]

$$\alpha_4 (Q_4 + Q_\phi)^2 + \alpha_6 Q_6^2 = 0 \quad (2.6)$$

Якщо схема послідовного включення струминного апарата передбачає наявність пакера (рисунок 2.1, б), то витрати потоку в інжекційній лінії струминного апарата дорівнюють витратам пластового флюїду, а витрати потоку на виході із свердловини перевищують продуктивність поверхневого насоса [10].

Аналогічні рівняння складають для визначення режиму роботи струминного апарата при наявності флюїдопроявів у випадку паралельної схеми його

під'єднання до системи циркуляції свердловини [10]. Наведена послідовність визначення робочого режиму струминного апарата може використовуватись під час проектування та експлуатації свердловинних насосів.

## 2.2 Аналіз досвіду проектування дозувального струминного насоса

Розглянемо досвід проектування дозувальних струминних насосів.

### *Струминний апарат конструкції Transvac Ejectors*

Струминні апарати компанії Transvac Ejectors [11] використовуються в усьому світі для різноманітних хімічних дозувань. Ежектори працюють без рухомих частин, тому ідеально підходять для безпечного та ефективного дозування хімікатів. Там, де інші механічні насоси-дозатори можуть зношуватися та виходити з ладу, ежектори пропонують безперебійну, надійну роботу день у день. Струминні насоси компанії призначені для точного у заданому процентному відношенні залучення, змішування та розведення вторинної рідини, усуваючи потребу в механічних дозуючих насосах і змішувачах (рисунок 2.2)

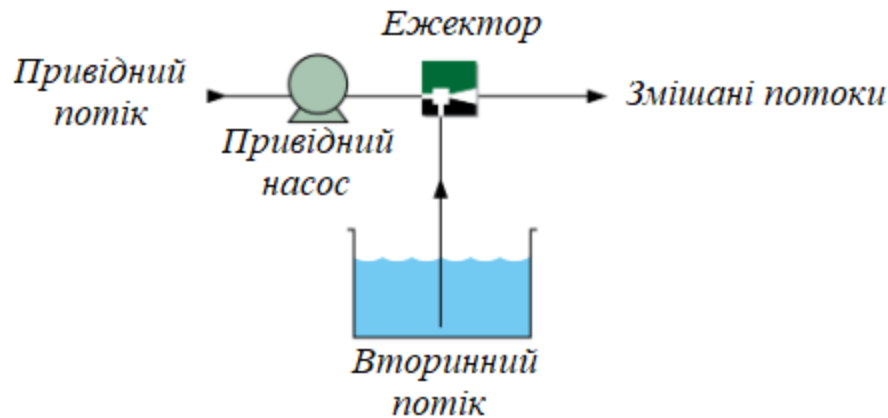


Рисунок 2.2 – Принцип роботи дозувального струминного апарата

Залежно від конкретного застосування [11] компанія може виготовляти системи для дозування рідин, твердих речовин і газів. Крім того, розроблено комбіновані системи для комбінованого дозування та опалення. Ежектори можуть бути сконструйовані як частина пакетів опор або встановлені безпосередньо в існуючий трубопровід. Ежектори для дозування хімікатів часто постачаються разом з системами змішування в резервуарах, які виготовляються компанією.

Системи дозування рідких хімікатів [11] працюють за допомогою технології рідинного струминного насоса (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – Струминний апарат для дозування рідких речовин

Ці ежектори [11] захоплюють рідкі хімічні речовини за допомогою рідинного двигуна під високим тиском. Часто буває так, що наявність рідинного привідного потоку вже є доступною на місці реалізації попереднього технологічного процесу. Після залучення потрібної хімічної речовини привідний потік і хімічна речовина ретельно змішуються і виходить з ежектора під тиском. Якщо є потреба дозувати кілька хімікатів одночасно, може використовуватись дві всмоктувальні лінії для введення хімікатів.

Для дозування твердих речовин [11] використовують струминні насоси для твердих речовин.



Рисунок 2.4 – Струминний апарат для дозування твердих речовин

Ці пристрої [11] можуть бути виготовлені у вигляді портативних або стаціонарних конструкцій. Також доступне розміщення на салазках. У більшості звичайних застосувань порошкоподібна версія дозованої подачі хімікатів містить бункер, шнековий дозатор, контейнер або мішок для сипучих матеріалів.

Також виготовляються екологічні моделі, із захисними кожухами. Вони допомагають запобігти передачі небезпечних хімікатів під час заповнення бункера або технічного обслуговування.

Ежектори дозування конструкції Crystal TCS [12] – це, по суті, рідинні едуктори, які працюють на основі принципу струминної труби Вентурі (рисунок 2.5)

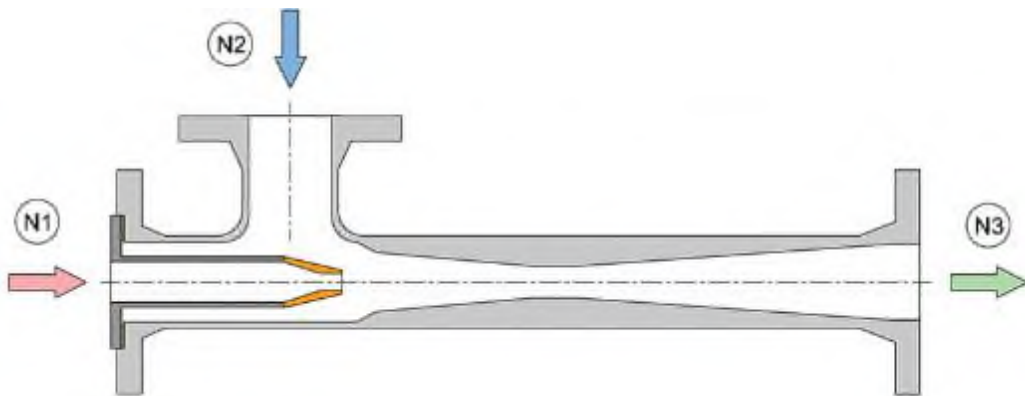


Рисунок 2.5 – Дозувальний ежектор конструкції Crystal TCS

Дозувальні ежектори відповідно до рисунка 2.5, зазвичай, мають 3 лінії [12]:

1. Впуск рідини високого тиску (НР).
2. Всмоктування.
3. Вихід.

Під час роботи ежектори-дозатори можуть [12] створювати різницю тиску на всмоктувальному та випускному отворах. Ежектори дозування використовують енергію рідини, що перекачується і надходить через впуск рідини високого тиску, щоб створити цей перепад тиску. Це дозволяє використовувати ежектори-дозатори для створення низького тиску на його всмоктуванні. Низький тиск дозволяє дозуючим ежекторам всмоктувати рідини через всмоктувальну лінію. Всмоктувана рідина змішується з рідиною високого тиску всередині ежектора та виходить з вихідного отвору. Нагнітання містить суміш рідини високого тиску і всмоктувальної рідини. Зовнішній вигляд дозувального ежектора конструкції Crystal TCS показаний на рисунку 2.6.



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд дозувального ежектора конструкції Crystal TCS

Це явище дозволяє [12] використовувати ежектори дозування для всмоктування та доставки контрольованої кількості середовища (рідин, порошків). Контролюючи кількість всмоктуваного носія та потік рідини високого тиску, можна отримати точне дозування за допомогою дозувального ежектора. Крім того, робочі потоки можна контролювати шляхом регулювання тиску рідини високого тиску, тиску всмоктування та вихідного отвору, і таким чином, також можна отримати контроль над ступенем дозування. Крім того, дозуючий ежектор також можна використовувати для перекачування розведеного середовища, таким чином усуваючи будь-яку потребу в додатковому насосі.

Типові області використання ежектора конструкції Crystal TCS [12]:

- дозування кислоти (сірчаної кислоти, соляної кислоти);
- дозування лугу;
- дозування їдких речовин;
- дозування вапна;
- дозування порошку (активоване вугілля, вапняний порошок, карбонат кальцію).

Особливості дозуючих ежекторів [12]:

- виконує подвійну функцію: дозування та перекачування;

- можливість регулювати точну кількість дозування для застосування;
- здатність працювати з порошками, гранулами та кусками речовини;
- індивідуально розроблені моделі – гарантують ідеальну відповідність заданим умовам;
- режим роботи самовсмоктування;
- доступність кількох типів кінцевих з'єднань – фланцеве, різьбове;
- доступний у великому асортименті матеріалів.

Таблиця 2.1 – Матеріал виготовлення дозувальних ежекторів [12]

<b>Металевий</b>	<b>Неметалевий</b>
Нержавіюча сталь SS 304 / SS 316	PVC (полівінілхлорид)
Дуплекс і супердуплекс з нержавіючої сталі	PP (поліпропілен)
Екзотичні метали (хастеллой, інконель, титан)	PTFE (політетрафторетилен)

Переваги дозувальних ежекторів конструкції Crystal TCS [12]:

- статичний пристрій без будь-яких рухомих частин – гарантує тривалу надійність і усуває необхідність обслуговування;
- витримує потрапляння твердих часток в ежектор – запобігає раптовим поломкам;
- невеликий і компактний розмір – дозволяє встановлювати в тісних і важкодоступних місцях;
- безшумна робота;
- функція без іскри – можна безпечно використовувати у небезпечних і легкозаймистих зонах;
- виготовляється з кількох матеріалів – дозволяє використовувати найбільш економічні та хімічно сумісні матеріали для застосування.

## **3 РОЗРОБЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА**

### **3.1 Схема компоновки дозувального струминного насоса**

Основним недоліком мембранних насосів-дозаторів слід вважати невисоку точність дозування (порівняно з плунжерними). Це пов'язано [13]:

а) з циклом коливань мембрани (неможливо передбачити режим розтягування/стиснення еластомеру, особливо при змінах температури середовища, що перекачується);

б) з накопиченої з часом «втоми» матеріалу мембрани (еластомір втрачає свої початкові характеристики, розтягується і, зрештою, погіршується як точність дозування, а й основні характеристики насоса).

Другий негативний фактор [13] використання насосів-дозаторів цього типу знову ж таки пов'язаний з мембранами, точніше з їх механічною міцністю. Вплив великих механічних включень на поверхню мембрани може призвести до руйнування, і як наслідок, до втрати герметичності робочої камери.

Насоси для дозування хімічних речовин відомі своєю надійністю [14]. Вони рідко ламаються, і більшість поломок, як правило, пов'язані зі зносом робочих деталей внаслідок тривалої експлуатації. В перистальтичних дозаторах виходить з ладу еластична трубка, у плунжерних – ущільнювальні кільця плунжера, що призводить до протікання. Ці деталі можна замінити протягом одного робочого дня. Але є й інший вид поломок, які трапляються з насосами-дозаторами. Оскільки більшість дозаторів працюють з агресивними хімічними речовинами, існує небезпека потрапляння цих речовин під корпус дозатора, що призводить до псування електронної плати, соленоїда або електроприводу.

Таке трапляється найчастіше через недотримання правил експлуатації насосів-дозаторів [14]:

1. Неправильне обслуговування інжекційного клапана. Так як більшість дозаторів працюють з агресивними або в'язкими речовинами, інжекційний

клапан іноді забивається. Якщо не очищати його вчасно, то рідина, що перекачується, затримується в насосі. Це призводить до підвищення тиску, робоча мембрана насоса розривається та хімічні реагенти потрапляють всередину корпусу. Ще одна поширена помилка – встановлення інжекційного клапана безпосередньо над насосом. При його протіканні речовина, що дозується, капає на корпус насоса, проникаючи всередину через експлуатаційні отвори [14].

2. Недбале поводження з клапаном: розвітрювання [14]. Якщо клапан для відведення повітря закручений не до кінця, або на нього не надіта трубка для відведення хімічних речовин, то відбувається протікання речовини, що дозується на корпус насоса, внаслідок чого відбувається потрапляння всередину.

3. Ослаблення затискних гайок [14]. Приблизно через кожні 800 годин роботи дозатора необхідно підкручувати затискні гайки клапана. Якщо цього не робити, рідина протікатиме і псуватиме деталі дозатора.

4. Насос не промивається [14]. Якщо між дозуванням різних видів хімічних речовин насос не промивати, то між залишками попередньої та новою речовиною відбувається хімічна реакція. Вона може бути цілком невинною, а може зіпсувати насос. Така ситуація відбувається, якщо не промивати дозатор перед тим, як поставити його на консервацію. Залишки речовини зав'язнуть, кристалізуються та заб'ють елементи насоса.

5. Використання речовин, небезпечних для ущільнюючих деталей дозатора [14]. Важливо стежити, щоб матеріал ущільнюючих деталей був стійкий до видів агресивної хімічної речовини, які перекачуються через дозатор. Хімічна стійкість прописана у паспорті насоса. Ігнорування цих властивостей призводить до руйнування прокладок і трубок і, як наслідок, протікання рідини в корпус дозатора.

6. Попадання на дозатор сторонніх речовин [14]. Якщо дозатор встановлений в умовах інтенсивного виробництва, він повинен бути накритий кришкою захисною або іншим засобом захисту. Кислота, луг, розчинник і навіть рідкі

харчові продукти при попаданні на плату або електропривод руйнують насос (згоріла плата, покритися іржею соленоїд та кріпильні болти).

7. Недотримання термінів обслуговування [14]. Перистальтичні трубки, мембрани, клапани необхідно міняти одразу після фіксації несправності. Також не можна ігнорувати терміни профілактичного огляду дозаторів, зазначені у техпаспорті. Якщо не оглядати насос кілька місяців, потім може бути вже пізно.

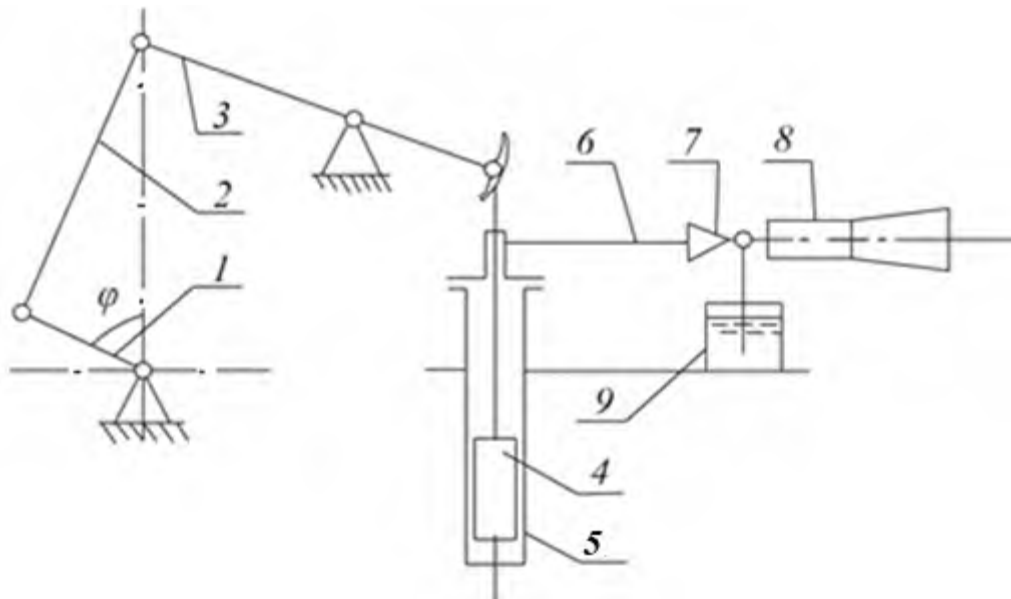
8. Непрофесійний ремонт дозаторів [14]. Часто в сервісні центри з обслуговування насосів-дозаторів приносять обладнання, яке не вдалося полагодити самотужки. Після такого “ремонту” дозатори часто перебувають у стані набагато гіршому, ніж якби його взагалі не чіпали. Щоб цього не сталося, допускати до ремонту обладнання можна лише фахівців.

Враховуючи, що струминний насос не має рухомих частин і є стійким до агресивних рідини з механічними включеннями його використання в системах подачі інгібіторів в свердловину відрізняється більшою надійністю ніж традиційні компоновки дозувальних насосів.

На рисунку 3.1 показана схема спільного використання наземного приводу верстата-качалки з поверхневим струминним насосом.

Внаслідок обертання ланки кривошипу 1, коливального руху ланки шатуна 2 та обертового руху ланки балансиру 3 колона насосних штанг рухається зворотно-поступально та приводить в дію занурений плунжерний насос 4. Внаслідок роботи зануреного плунжерного насоса 4 продукція свердловини підіймається по каналу насосно-компресорних труб та надходить в напірний трубопровід 6, що зв'язує свердловину з пунктом збору та підготовки нафти. Суттєвою проблемою є корозія напірних трубопроводів внаслідок наявності в продукції свердловин агресивних речовин та її високої обводненості. Для запобігання корозії напірних трубопроводів часто застосовують систему подачі інгібіторів корозії, яка дозволяє захистити внутрішні поверхні комунікацій та підвищити ресурс їх використання. На схемі 3.1 показано використання для подачі інгібітора

в трубовід струминного насоса, що складається з сопла 7 та камери вирівнювання швидкостей і ділянки розширення потоку 8.



1 – ланка кривошипу; 2 – ланка шатуна; 3 – ланка балансиру; 4 – занурений плунжерний насос; 5 – експлуатаційна колона; 6 – напірний трубовід; 7 – сопло; 8 – камера вирівнювання швидкостей та ділянка розширення потоку; 9 – резервуар з хімічними реагентами

Рисунок 3.1 – Компонівка схеми спільного використання наземного приводу верстата-качалки з поверхневим струминним насосом

Заміна традиційних дозувальних насосів струминним апаратом дає змогу підвищити ефективність запобігання корозії напірних трубопроводів та підвищити рівень екологічної безпеки при експлуатації нафтових свердловин на пізній стадії розробки родовища.

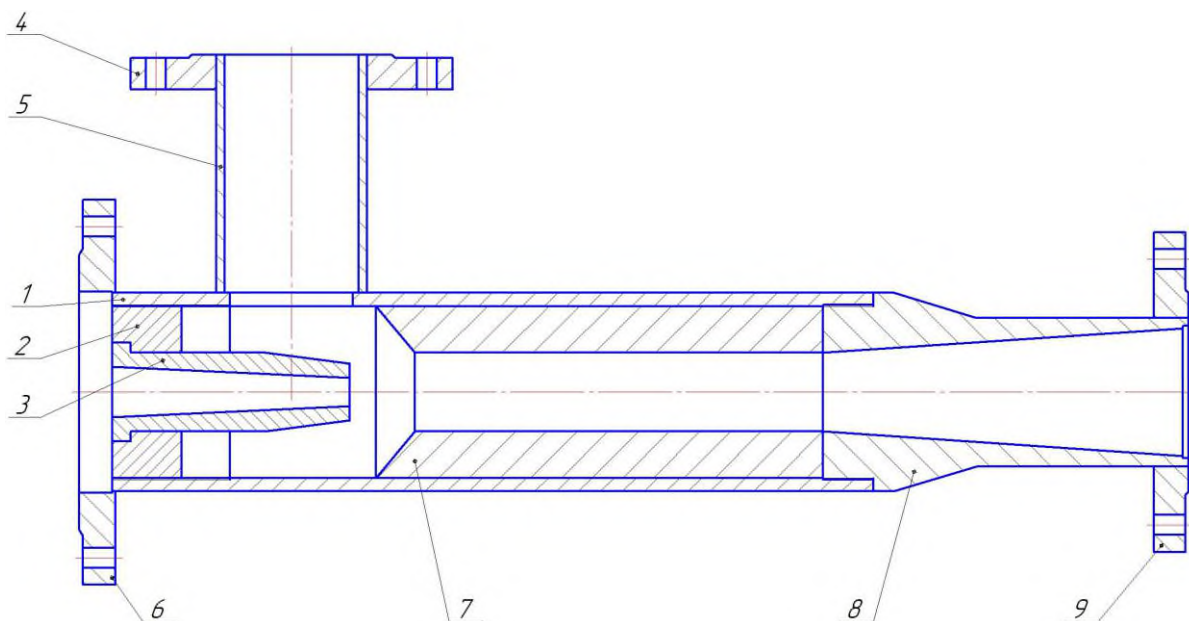
Враховуючи особливості робочого процесу приводу верстата-качалки витрата робочого потоку, що надходить на сопло струминного апарата, змінюється за синусоїдальним законом, що має суттєвий вплив на робочий процес ежекційної системи. З практики використання свердловинних струминних насосів відомі різні схеми створення робочої витрати ежекційних систем. При застосуванні «жорсткої» характеристики силового приводу створюваний ним потік є постійним за витратою та тиском. Відомий також пульсуючий характер зміни

гідродинамічних характеристик потоку, що спрямовується на сопло струминного апарата. Останній час в практиці застосування свердловинних струминних насосів з'явилась тенденція використання закручених робочих та інжекттованих потоків в ежекційних системах. Закручуванню може піддаватись як робочий потік [15], [16] так і інжекттований [17], [18]. Закручуванню може піддаватись також одночасно інжекттований та змішуваний потоки [19].

Зміна робочого потоку в запропонованому струминному насосі-дозаторі за синусоїдальним законом необхідно враховувати при розробленні методу визначення його характеристик.

### 3.2 Опис конструкції дозувального струминного насоса

Розроблений дозувальний струминний насос показаний на рисунку 3.2.



- 1 – корпус; 2 – втулка; 3 – робоча насадка; 4 – фланець всмоктувальний;  
5 – патрубок; 6 – фланець корпусний; 7 – камера змішування; 8 – дифузор;  
9 – фланець дифузорний

Рисунок 3.2 – Дозувальний струминний насос

Насос складається з дев'яти деталей циліндричної або циліндрично-конічної форми (рисунок 3.2): корпуса 1, втулки 2, робочої насадки 3, всмоктувального фланця 4, патрубку 5, корпусного фланця 6, камери змішування 7, дифузора 8 та дифузорного фланця 9.

Корпус 1 призначений для монтажу в ньому втулки 2, робочої насадки 3 та камери змішування 7. До одного торця приварений всмоктувальний фланець 4, а до іншого торця за допомогою різьбового з'єднання приєднаний дифузор 8. Симетрично до осі отвору на боковій циліндричній поверхні корпусу приварений патрубок 5. Втулка 2 вгвинчується в корпус 1 і призначена для фіксації в ній робочої насадки за допомогою упорного бурта. Робоча насадка 3 призначена для зміни параметрів протікання основного потоку рідини. Камера змішування 7 призначена для змішування основного та додаткового (дозуючого) потоків рідини. Вона встановлюється всередині корпусу 1 і спирається торцем в торець дифузора 8. Через патрубок 5 подається дозуюча рідина. Всмоктувальний 4, корпусний 6 та дифузорний 9 фланці призначені для під'єднання струминного насоса до робочого та дозувального трубопроводів. Кожне фланцеве з'єднання монтується за допомогою шести шпильок та дванадцяти гайок з різьбою М8.

Струминний дозувальний насос використовує енергію основного потоку. Внаслідок виникнення розрідження в робочій камері насоса, яка знаходиться після робочої насадки, відбувається захоплення потоку хімічного реагенту з дозувальної лінії. Далі робочий та дозувальний потоки змішуються в камері. змішування, а після проходження через дифузор параметри потоку вирівнюються до значень, які були в трубопроводі до струминного насоса.

На вході в камеру змішування струминного насоса робочий та інжектований потік мають близький до рівномірного профілю швидкостей. Відмінність від рівномірного профілю пояснюється тим, що процес вирівнювання гідродинамічних параметрів змішуваних потоків починається в приймальній камері і продовжується в камері змішування. При моделюванні робочого процесу, зазвичай, приймають профілі швидкостей змішуваних потоків рівномірним. При віддаленні від входу в камеру змішування відбувається розмивання робочого та інжектованого струменя. Профіль швидкостей в області між робочим та інжектованим потоком стає нерівномірним внаслідок різниці абсолютних значень

кінематичних параметрів змішуваних середовищ. Випівнювання швидкостей в камері змішування демонструє припинення процесу змішування потоків.

Необхідно також відзначити, що внаслідок особливостей компоновки схема використання дозувального струминного насоса більш схильна до роботи в кавітаційному режимі ніж звичайні традиційні конструкції свердловинних струминних насосів.

## **4 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМІННОГО НАСОСА**

### **4.1 Аналіз робочого процесу дозувального струмінного насоса**

З метою підвищення ефективності реалізації нафтогазових ежекційних технологій визначені робочі інтервали напірної характеристики для основних схем використання свердловинних струмінних насосів. Локалізація робочої ділянки напірної характеристики свердловинного струмінного насоса визначається характером технологічного процесу, що реалізується з використанням ежекційних систем. Зокрема, струмінний насос призначений для виклику припливу з продуктивного горизонту повинен забезпечити максимально можливе зниження тиску в підпакерній області за мінімальної початкової витрати пластової рідини. Наддолотний струмінний насос нагнітального типу повинен поєднувати високі значення створюваного напору та максимально можливу за умов експлуатації витрату інжектowanego потоку. Нафтовий струмінний насос крім створення достатнього напору та витрати інжектowanego потоку повинен забезпечити максимально можливе значення коефіцієнта корисної дії. Це пов'язане з тим, що процес нафтовидобутку є довготривалим і навіть незначне зменшення його енергоефективності здатне викликати суттєві економічні втрати.

Область максимального напору та мінімального коефіцієнта інжекції реалізується під час виклику припливу з продуктивного горизонту при освоєнні нафтових свердловин після завершення процесу буріння. Центральна частина напірної характеристики визначає режим експлуатації нафтового струмінного насоса, коли коефіцієнт корисної дії ежекційної системи приймає максимальні значення. Кінцева ділянка напірної характеристики, коли відносний напір приймає мінімальні, а коефіцієнт інжекції максимальні значення, відповідає режимним параметрам нагнітально-всмоктувального наддолотного струмінного насоса. Значення відносного напору для нагнітального наддолотного струмінного насоса локалізовані в інтервалі між гідродинамічними параметрами ежекційних

систем призначених для виклику припливу з продуктивного горизонту та експлуатації нафтових свердловин. Характеристики струминного насоса призначеного для промивання піскових пробок близькі до режимних параметрів нагнітально-всмоктувальної наддолотної ежекційної системи.

На рисунку 4.1 показана процедура визначення координат робочої точки свердловинного струминного насоса, яка визначає режимні параметри його експлуатації: відносний напір та коефіцієнт інжекції.

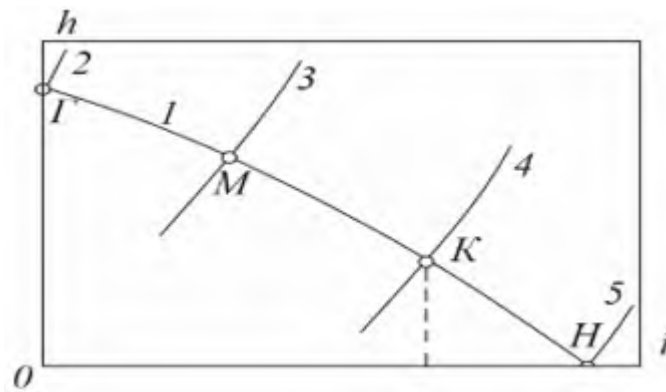


Рисунок 4.1 – Процедура визначення координат робочої точки свердловинного струминного насоса: 1 – напірно витратна характеристики гідромашини; 2 – 5 – характеристики гідравлічної системи

$\Gamma, M, K, H$  – координати режимних робочих точок

Точки  $\Gamma, M, K, H$  на графіку рисунка 4.1 визначають співвідношення відносного напору та коефіцієнта інжекції, що відповідають діючому режиму роботи гідромашини. Точки  $\Gamma, M, K, H$  визначають характерні режими роботи струминного насоса. Точка  $\Gamma$  відповідає режиму, коли струминний насос працює в умовах максимального напору та нульового значення коефіцієнта інжекції. Такий режим, зокрема, має місце у випадку експлуатації струминного насоса під час освоєння свердловин, коли приплив пластової рідини з продуктивного горизонту ще відсутній. Режим максимального напору визначає максимально допустиму глибину розміщення струминного насоса в свердловині або мінімально допустиму витрату робочого потоку при застосуванні пакерних компоновок. Точка  $K$  визначає режим роботи струминного насоса у випадку розриву потоку в його

проточній частині, що відбувається внаслідок зниження фактичного тиску менше його критичного допустимого значення. Такий режим роботи струминного насоса визначає мінімально допустиму глибину його встановлення в свердловині або максимально допустимі значення робочої та інжектованої витрати. Точка  $H$  характеризує роботу струминного насоса з нульовою різницею тисків змішаного та інжектованого потоку коли величина відносного напору приймає нульові значення. Таке співвідношення гідродинамічних параметрів може бути реалізовано у випадку експлуатації наддолотного нагнітально-всмоктувального струминного насоса або при застосуванні ежекційних технологій при видаленні з свердловини піску. Точкою  $M$  на графіку рисунка 4.1 позначено режим роботи струминного насоса, який входить в область енергоефективних режимів експлуатації ежекційної системи.

Показані на рисунку точки  $\Gamma$ ,  $M$ ,  $K$ ,  $H$  корелюються з аналогічними режимами, які позначені на графіку залежності витрати робочого потоку від кута повороту ланки кривошипу верстата-качалки (рисунок 4.2).

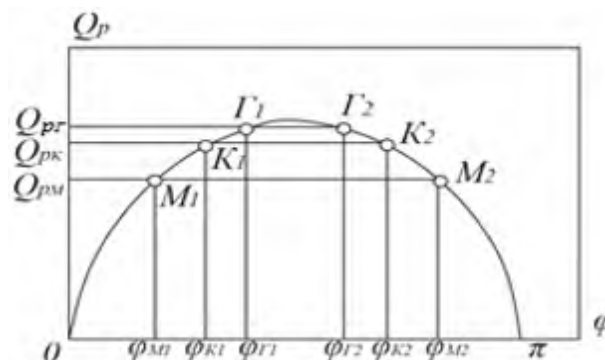


Рисунок 4.2 – Залежність витрати робочого потоку від кута повороту ланки кривошипу верстата-качалки

Показана на рисунку 4.2 залежність отримана із врахуванням закону руху виконавчого органу зануреного глибинного штангового насоса. Зважаючи на симетричність показаної на рисунку 4.2 залежності показані на рисунку 4.1 точки  $\Gamma$ ,  $M$ ,  $K$ ,  $H$  можуть бути зображені у вигляді пари відповідних позначень, які розміщені на висхідній та низхідній ділянках кривої. Точки  $M_1M_2$  визначають границі області максимальних значень ККД струминного насоса. Дана область

обмежена кривою  $M_1\Gamma_1$ , горизонталлю  $\Gamma_1\Gamma_2$ , кривою  $\Gamma_2M_2$  та горизонталлю  $M_2M_1$  і визначає сукупність оптимальних з енергетичної точки зору характеристик струминного насоса. Точки  $M_2M_1$  корелюються з точкою перетину кривих 1, 3 на графіку рисунка 4.1. Область  $K_1\Gamma_1\Gamma_2K_2$  визначає роботу дозувального струминного насоса в кавітаційному режимі. Необхідно відзначити, що область, яка знаходиться вище горизонталі  $\Gamma_1\Gamma_2$  є неробочою, оскільки в даній області продуктивність насоса відсутня. Точки  $K_1K_2$  корелюються з точкою перетину залежностей 1, 4 на графіку рисунка 4.1. Точки  $\Gamma_1, \Gamma_2$  визначають роботу струминного насоса в умовах недостатнього створюваного напору. Точки  $\Gamma_1, \Gamma_2$  корелюються з точкою перетину кривих 1, 2 на графіку залежності витрати робочого потоку від кута повороту ланки кривошипу верстата-качалки.

Робочий процес дозувального струминного насоса визначає концентрацію хімічних реагентів в продукції свердловини. Точність розрахунку витрати інжектваного потоку безпосередньо визначає ефективність застосування інгібіторів. У випадку недостатньої концентрації хімічних реагентів процес запобігання корозії технологічних трубопроводів буде недостатньо ефективним. Якщо кількість реагента в потоці перевищуватиме мінімально необхідну для попередження корозії будуть витрачатись завищені ресурси.

Залежність, яка показана на рисунку 4.1 обґрунтовує необхідність використання рівнянь напірної характеристики струминного насоса та рівняння, що визначає характеристику гідравлічної системи. Характеристика струминного насоса розраховується з використанням закону збереження кількості руху рідини в замкненому об'ємі камери змішування, який доповнюється законом збереження енергії у вигляді рівняння Бернуллі та закону збереження неперервності потоку в межах одного гідравлічного каналу. Таке співвідношення законів гідродинаміки застосовується в більшості методик розрахунку робочого процесу струминного насоса. При застосуванні комп'ютерних моделей використовують рівняння Нав'є-Стокса у вигляді часткових похідних, які описують рух змішуваних

потоків. Диференціальні рівняння руху змішуваних потоків доповнюють напівемпіричними теоріями турбулентності, які дозволяють отримати розв'язок з використанням методу скінченних елементів. Визначення режиму роботи дозувального струминного насоса, таким чином, зводиться до виведення рівняння характеристики гідравлічної системи і його спільного розв'язку з рівнянням напірної характеристики.

З метою виведення характеристики гідравлічної системи струминного насоса необхідно розрахувати величину тисків, які входять до співвідношення, що характеризує безрозмірний напір створюваний ежекційною системою.

$$P_3 = \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda_n \rho l_n Q_3^2}{d_n^5} = \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda_n \rho l_n Q_p^2 (1+i^2)}{d_n^5}; \quad (4.1)$$

$$P_p = \frac{\rho Q_p^2}{2\mu_p^2 f_p^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda_n \rho l_n Q_p^2 (1+i)^2}{d_n^5}; \quad (4.2)$$

$$P_i = P_{am} - \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda_i \rho l_i Q_i^2}{d_i^5} = P_{am} - \frac{8}{\pi^2} \frac{\lambda_i \rho l_i Q_p^2 i^2}{d_i^5}, \quad (4.3)$$

де  $\lambda_n, \lambda_i$  – коефіцієнти Дарсі, що визначають втрати тиску в трубопроводах на виході змішаного потоку та на вході інжектваного потоку;

$l_n, l_i$  – довжина трубопроводів відведення змішаного потоку та підведення інжектваного потоку;

$d_n, d_i$  – діаметри трубопроводів відведення змішаного потоку та підведення інжектваного потоку;

$Q_3, Q_p, Q_i$  – секундний об'єм рідини у сумарному, активному та пасивному потоках;

$i$  – співвідношення витрат інжектваного та робочого потоків;

$\mu_p$  – дослідний коефіцієнт витрати сопла;

$f_p$  – площа кільцевого перерізу сопла;

$P_{am}$  – величина тиску у навколишньому середовищі.

Тиск в напірній лінії струминного насоса  $P_3$  визначається величиною гідравлічних втрат у сумарному потоці (рівняння (4.1)). В процесі визначення тиску активного (привідного) потоку додатково необхідно враховувати гідравлічні втрати в зосередженому місцевому опорі, тобто в соплі струминного насоса (рівняння (4.2)). Відмінність у визначенні тиску в пасивному потоці на відміну від свердловинних струминних насосів полягає у необхідності враховувати тиск навколишнього середовища (рівняння (4.3)). На відміну від свердловинних струминних насосів рівняння для визначення тисків у сумарному, активному та пасивному потоках не враховують величину гідростатичного тиску.

З метою спрощення розрахунків рівняння напірної характеристики струминного насоса може бути суттєво спрощене шляхом підстановки у вихідну формулу значень постійних величин, які визначають нерівномірність розподілу кінематичних параметрів у змішуваних потоках. Враховуючи загальноприйняте співвідношення квадратів діаметрів камери вирівнювання швидкостей та сопла рівняння напірної характеристики запишемо у вигляді

$$h = \frac{1}{K_{сн}} \left[ 1,76 + 0,7 \frac{i^2}{K_{сн} - 1} - 1,07(1 + i)^2 \right] \quad (4.4)$$

Рівняння характеристики гідравлічної системи струминного насоса може бути записане для всіх розглянутих на рисунку 4.1 режимів роботи струминного насоса. Розв'язок системи рівняння (4.4) та рівняння характеристики гідравлічної системи дає змогу визначити режимні параметри експлуатації дозувального струминного насоса.

#### 4.2 Розрахунок параметрів роботи ежекційної системи

Використовуючи синусоїдальний закон руху робочого органу штангової глибинної насосної установки запишемо рівняння для розрахунку робочої витрати дозувального струминного насоса

$$Q_p = F \left( \frac{k_1}{k_2} \right) \omega r \sin \varphi = F \left( \frac{k_1}{k_2} \right) \frac{d\varphi}{dt} r \sin \varphi, \quad (4.5)$$

де  $F$  – площа поверхні робочого органу глибинного насоса, що контактує з пластовою рідиною;

$\omega$  – швидкість обертового руху ланки кривошипу приводу верстата-качалки;

$r$  – радіус обертового руху ланки кривошипу приводу верстата-качалки;

$\frac{k_1}{k_2}$  – параметр, що враховує довжину окремих ланок балансира верстата-качалки.

Після підстановки значень величин  $F$ ,  $\frac{k_1}{k_2}$ ,  $\omega$  та  $r$  в рівняння (4.5) отримуємо залежність витрати робочого потоку струминного насоса-дозатора від кута повороту ланки кривошипу приводу верстата-качалки (рисунок 4.3, а).

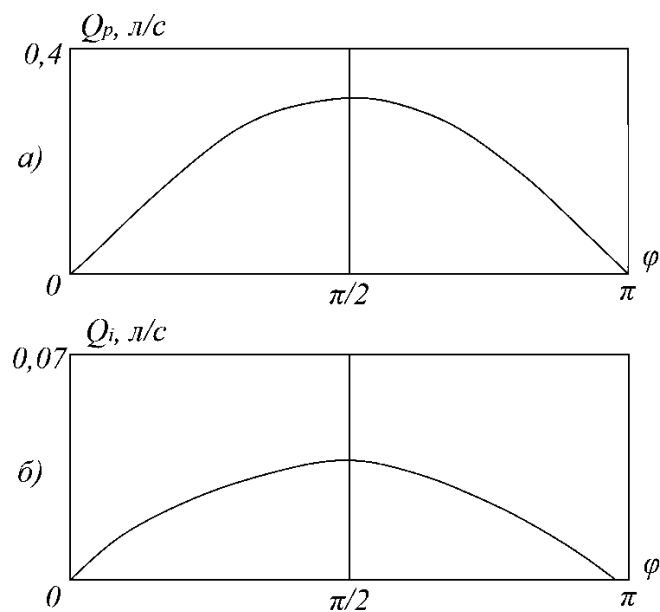


Рисунок 4.3 – Залежність витрати робочого (а) та інжектowanego (б) потоку дозувального струминного насоса від кута повороту ланки кривошипу приводу верстата-качалки

Залежність витрати інжектowanego потоку дозувального струминного насоса від кута повороту ланки кривошипу приводу верстата-качалки (рисунок 4.3, б) отримана використовуючи співвідношення  $i = Q_i / Q_p$ .

Розв'язок системи рівнянь (4.1) – (4.4) для випадку нульового співвідношення витрат інжектowanego та робочого потоків дозволяє розрахувати робочий

режим струминного насоса, що відповідає його роботі в умовах максимальних значень відносного напору.

## 5 ПОБУДОВА 3D МОДЕЛЕЙ ДОЗУВАЛЬНОГО СТРУМИННОГО НАСОСА

SolidWorks – це система автоматизованого проектування, що використовує знайомий користувачеві графічний інтерфейс Microsoft Windows [19]. SolidWorks дозволяє інженерам-проектувальникам швидко відобразити свої ідеї в ескізі, експериментувати з елементами і розмірами, а також створювати моделі і докладні креслення. Модель SolidWorks складається з деталей, зборок і креслень. Зазвичай спочатку малюється ескіз, створюється основа, а потім в модель додаються численні елементи. (Можна також почати з імпортованої поверхні або геометрії твердого тіла.) Можна скільки завгодно вдосконалювати креслення, додаючи, змінюючи елементи і їх порядок. Зв'язок між деталями, зборками та кресленнями гарантує, що зміни, зроблені в одному виді, автоматично виконуються у всіх інших видах. Креслення або зборки можна створювати на будь-якому етапі в процесі проектування. Додаток SolidWorks дозволяє створювати власну настройку функцій, що відповідає конкретним вимогам.

У додатку SolidWorks кожна деталь, зборка або креслення [19] називається документом, а кожен документ відображається в окремому вікні. (Кожен документ креслення може містити кілька аркушів креслень). На екрані може бути відкрито одночасно кілька вікон документів деталі, зборки і креслення. Можна також одночасно відобразити на екрані кілька видів одного документа. Можна скільки завгодно вдосконалювати креслення, додаючи, змінюючи елементи і їх порядок.

SolidWorks дозволяє вирішувати наступні завдання [20]:

*Конструкторська підготовка виробництва:*

- 3D проектування виробів (деталей і зборок) будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення;
- створення конструкторської документації;
- промисловий дизайн;

- проектування комунікацій (електроожгутів, трубопроводи тощо);
- інженерний аналіз (міцність, стійкість, теплопередача, частотний аналіз, динаміка механізмів, газо / гідродинаміка, оптика і світлотехніка, електромагнітні розрахунки, аналіз розмірних ланцюгів і ін.);
- експрес-аналіз технологічності на етапі проектування.

*Технологічна підготовка виробництва:*

- проектування оснащення і інших засобів технологічного оснащення;
- аналіз технологічності конструкції виробу;
- аналіз технологічності процесів виготовлення (лиття пластмас, аналіз процесів штампування, витяжки, гнуття та ін.);
- розробка технологічних процесів;
- матеріальне та трудове нормування;
- механообробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ, верифікація УП, імітація роботи верстата. Фрезерна, токарна, токарно-фрезерна і електророзійна обробка, лазерна, плазмова і гідроабразивна різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини;
- управління даними і процесами на етапі ТПП.

*Управління даними і процесами:*

- робота з єдиною цифровою моделлю виробу;
- електронний технічний і розпорядчий документообіг;
- технології колективної розробки;
- робота територіально-розподілених команд;
- ведення архіву технічної документації;
- проектне управління;
- захист даних;
- підготовка даних для ERP (система управління виробництвом), розрахунок собівартості.

Спершу створюємо 3D моделі кожної з дев'яти деталей дозувального струминного насоса (рисунок 5.1).



1 – корпус; 2 – втулка; 3 – робоча насадка; 4 – фланець всмоктувальний;  
5 – патрубок; 6 – фланець корпусний; 7 – камера змішування; 8 – дифузор;  
9 – фланець дифузорний

Рисунок 5.1 – 3D моделі деталей дозувального струминного насоса

Оскільки всі вони мають циліндричну або конічну поверхні, попередньо створений за натуральними розмірами ескіз на проекції справа перетворюємо в

деталь методами обертання на  $360^\circ$  або витягування маточини на задану відстань. Отвори формуємо методом видавлювання отвору на ескізі. В разі необхідності на кромках формуємо фаски. Отвори на фланцях під кріпильні деталі створюємо коловим масивом. За допомогою довідкової геометрії вставляємо осьові лінії. Призначаємо матеріал деталей.

Наступний крок – створення збірки деталей. Послідовно відкриваючи елементи, зв'язуємо циліндричні поверхні концентрично, а необхідні торцеві поверхні за допомогою співпадіння.

3D модель дозувального струминного насоса представлена на рисунку 5.2, а його розріз на рисунку 5.3.

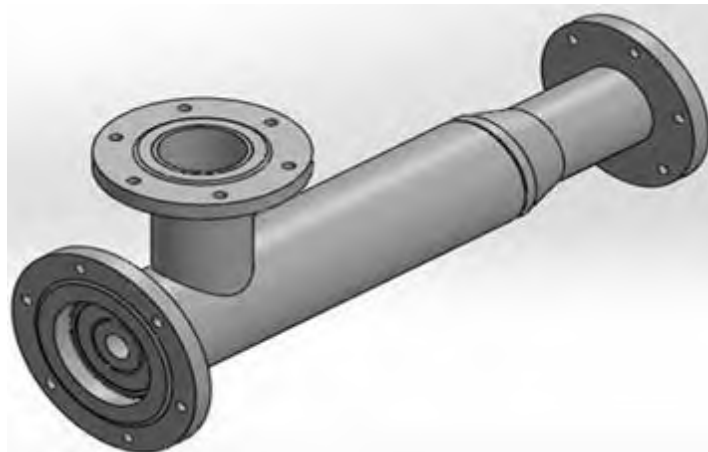


Рисунок 5.2 – 3D модель дозувального струминного насоса

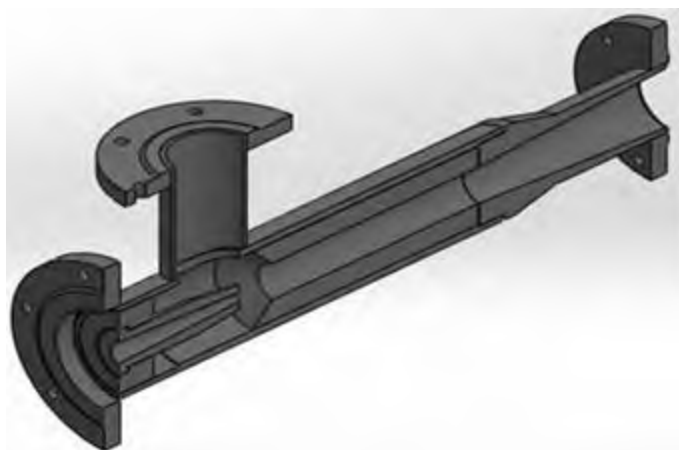


Рисунок 5.3 – Розріз на 3D моделі дозувального струминного насоса

Побудова 3D моделі є першим етапом комп'ютерного моделювання робочого процесу струминного дозувального насоса.

## ВИСНОВКИ

Для подачі в трубопроводі чи свердловині різноманітних хімічних реагентів використовують дозувальні насоси. Перспективним є використання дозувальних струминних насосів, які відрізняються невеликою масою та простотою конструкції, виготовлення, експлуатації та обслуговування.

В роботі на основі аналізу використовуваних в хімічній, харчовій та нафтовій галузях промисловості дозувальних насосів та блоків подачі хімреагентів спроектовано дозувальний струминний насос для подачі хімічних реагентів в горизонтальні трубопроводи, який під'єднується до останніх через фланцеві з'єднання.

На основі аналізу особливостей робочого процесу свердловинного струминного насоса та досвіду проектування дозувального струминного насоса виконано обґрунтування можливості застосування дозувальних струминних насосів для подачі хімреагентів в горизонтальні трубопроводи.

Проведено аналіз робочого процесу дозувального струминного насоса та виконано розрахунок параметрів роботи ежекційної системи. В програмному середовищі SolidWorks побудовано 3D модель дозувального струминного насоса.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Воловецький В.Б., Витязь О.Ю., Коцаба В.І., Щирба О.М., Витвицька О.М. Аналіз ускладнень при експлуатації газових і газоконденсатних свердловин та шляхи боротьби з ними. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2015. № 2(39). С.78–88.
2. Фик М. І., Хріпко О. І., Раєвський Я. О., Варавіна О. П. Розробка та експлуатація нафтових та нафтогазових родовищ: посібник для студ. ВНЗ / під ред. д-ра. техн. наук, проф. І. М. Фика. Харків, 2019. 149 с.
3. Вишневський Р.М., Григораш В.В., Кісіль І.С., Дранчук М.М., Литвин Б.Л. Застосування методу лінійної поляризації (LPR) для моніторингу ефективності інгібіторного захисту нафтопромислового обладнання. Методи та прилади контролю якості. 2008. № 21. С. 91–96.
4. Мельник А.П., Кривуля С.В., Крамарев С.О., Малік С.Г., Марценюк Т.І., Діхтенко К.М. Дослідження інгібіторів гідратуутворення для заміни метанолу. Нафтогазова галузь України. 2014. № 5. С. 20–21.
5. Бандуріна О.В., Захарченко Л.С. Аналіз ефективності застосування Інгібітора корозії СНПХ на родовищах Полтавщини. [https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/8206/1/Znpgmb\\_2010\\_2\\_23.pdf](https://reposit.nupp.edu.ua/bitstream/PolNTU/8206/1/Znpgmb_2010_2_23.pdf).
6. Воловецький В.Б., Гнітко А.В., Щирба О.М. Особливості солевідкладення у газоконденсатних свердловинах. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. 2018. № 48. С. 30–38. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-48-02>.
7. Дозувальний насос: принцип роботи й особливості пристрою. Engineering System. 09.01.2025. 6 р. <https://dosingtech.com.ua/uk/dozuvalnij-nasos-printsip-roboti-j-osoblivosti-pristroyu/?srsltid=AfmBOoqoQCLAz6HGq2A4eE04abG4Pfu28V3DKQGYxeMYaRzacDYFPfdg>.
8. Установка насосна блокова УНБ. Каталог продукції ТБ "ХНЗ". 10.01.25. <https://khnz.com.ua/ustanovka-blochna-mobilna->

[ubmo/?srsltid=AfmBOoqPqNH\\_BcBnm9EkikGFrJ049Dy8wKoPHXiV7Fey\\_uqGO\\_CgXG6tP](http://ubmo/?srsltid=AfmBOoqPqNH_BcBnm9EkikGFrJ049Dy8wKoPHXiV7Fey_uqGO_CgXG6tP).

9. Установка насосна блокова автоматизована УНБА-О-6,3-6,3-У4. Каталог продукції ТБ "ХНЗ". 10.01.25. 3 с. [https://flagma.ua/uk/ustanovka-nasosna-bloкова-avtomatyzovana-unba-o-6-3-6-3-u4-o16600831.html#google\\_vignette](https://flagma.ua/uk/ustanovka-nasosna-bloкова-avtomatyzovana-unba-o-6-3-6-3-u4-o16600831.html#google_vignette).

10. Паневник О.В. Методика визначення режиму роботи свердловинного струминного апарата. Нафтова і газова промисловість. 1996. № 4. С. 6–8.

11. Ejectors for Chemical Dosing. Transvac.10.01.25. 4 с. <https://www.transvac.co.uk/chemical-dosing/>.

12. Dosing Ejectors. Crystal TCS. 3 p. <https://www.crystalcs.com/dosing-ejectors.php>.

13. Дозуючі насоси мембранного типу (діафрагмові). Харківський насосний завод. Каталог. 11.01.25. 4 р. [https://khnz.com.ua/nasosi-dozuvalni-membranni/?srsltid=AfmBOopijzIgePqe9FcSxpNFnOLkEy\\_xXbEFsvjP6FPar0OD8\\_BQy-Ur](https://khnz.com.ua/nasosi-dozuvalni-membranni/?srsltid=AfmBOopijzIgePqe9FcSxpNFnOLkEy_xXbEFsvjP6FPar0OD8_BQy-Ur).

14. Поширені помилки під час експлуатації насосів-дозаторів. Каталог. Energy Systems. 3 р. 11.01.25. <https://dosingtech.com.ua/uk/poshyreni-pomylyky-pid-chas-eksploatatsiyi-nasosiv-dozatoriv/?srsltid=AfmBOopKrVhT0K>.

15. Hanada T., Sawamoto T., Takahashi K. In-line mixing for high reactive species using swirl flow ejector. 2018 XXV European Conference on Mixing “MIXING 15”: Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 50(6), pp. 932–936. 2016. <https://doi.org/10.1134/S0040579516060063>.

16. Samad A., Omar R., Hewakandamby B., Lowndes I., Short G. Swirl induced flow through a venturi-ejector. 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012, Rio Grande, Puerto Rico, USA, July 8-12, 2012, 2. pp. 65–70. <https://doi.org/10.1115/FEDSM2012-72093>.

17. Zhou, B., Fleck, B. A., Gauthier, J. E. Comparison of swirling effects on ejector performance using four turbulence models, *Canadian Aeronautics and Space Journal*, 469(4), pp. 178–182, 2000.

18. Banu, J., Mani, A. Numerical studies on ejector with swirl generator, *International Journal of Thermal Sciences*, 137, pp. 589–600, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.11.033>.

19. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем : навчальний посібник / В.Я. Ворошук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паланиця В.А., 2021. 164 с.

20. SolidWorks. 13.01.25. 7 p. <https://uk.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>.