

## ВСТУП

Пил є одним із найголовніших забруднювачів повітря при видобутку та переробці корисних копалин відкритим способом. Санітарно-гігієнічні вимоги до виробничого середовища визначають умови, за яких виключаються професійні захворювання та професійні отруєння. Без використання засобів зниження концентрації пилу в робочій зоні кар'єру або збагачувальної фабрики може досягати значень, що перевищують максимально допустимі норми.

Цехи гірничо-видобувних та збагачувальних комбінатів, такі як місця завантаження, розвантаження, дробильні відділення збагачувальних фабрик комбінатів кольорової та чорної металургії, вугільної промисловості, а також підприємств промисловості будівельних матеріалів оснащені різноманітним навантажувальним, дробильним, сортувальним та транспортним обладнанням. При перевантаженні та переробці корисних копалин у цьому устаткуванні утворюється значна кількість тонкодисперсного пилу. Тонкодисперсний пил, що виділяється в атмосферу виробничих приміщень шкідливо впливає на здоров'я працюючих і може викликати серйозні професійні захворювання.

Важливі заходи щодо оздоровлення умов праці в цехах є боротьба з утворенням та виділенням в атмосферу пилу виробничих приміщень.

Боротьбою з пилом займається на підприємствах пиловентиляційна служба. Вирішенням цієї проблеми також зайняті науково-дослідні та проектні інститути, досвідчені; заводи та лабораторії, які за останні роки розробили більш удосконалені знепилюючі та пилоочисні пристрої, установки пневматичного прибирання пилу, зрошувальні агрегати, що створюють умови для покращення праці робітників.

Для ефективного пилоподавлення використовується зрошення для пилоподавлення, особливо за участю клеючої добавки.

Виділяють різні види зрошення: високонапірне, низьконапірне, пневмогідрозрошення, водяні та туманоутворюючі завіси. Існує також пароконденсаційний спосіб пилоподавлення, особливо ефективний у зимовий час. Пара під тиском розриває струмінь перегрітої води, перетворюючи її на смолоскип

дрібнодисперсного аерозолю. Зазначається, що зимовий час особливо небезпечний для здоров'я гірників, оскільки збільшення енерговитрат веде до збільшення частоти дихання, отже, більше пилу осідає на легенях, таким чином, ризик профзахворювань збільшується в 1,5 раза. Для використання в зимових умовах пропонується інноваційна форма форсунки для пилоподавлення снігом. Пиліві частки за негативних температур виступають центрами кристалізації, з'єднуються з частинками води, відбувається утворення штучного снігу. Пропонується також аеропенний метод пилоподавлення з використанням пін високої кратності, що включають до складу поверхнево-активні речовини. Метод характеризується високою ефективністю.

На основі сопла Лавалю використовують форсунку з оптимальними параметрами роботи: діаметр форсунки, об'єм та тиск води. На сучасних підприємствах застосовують від 4 до 6 форсунок спринклерного типу.

Форсунки розпорошують воду, розбиваючи її на дуже дрібні крапельки, які готові з'єднатися з частинками зваженого пилу такого ж розміру. Однак відомо, якщо водяна крапля занадто велика, дрібні частинки пилу просто проходять повз і навіть відштовхуються навколишнім повітрям. Частинки пилу можуть пропускати великі краплі води, але добре з'єднуються з маленькими крапельками такого ж розміру.

Отже дослідження процесу гідравлічного пилопригнічення та визначення раціональних параметрів форсунок розпилення є **актуальним науково-технічним завданням**.

**Метою роботи** є покращення режиму роботи системи пилопригнічення за рахунок обґрунтування раціональних параметрів форсунок розпилення.

**Об'єкт досліджень** – процес гідравлічного пилоподавлення.

**Предмет дослідження** – параметри форсунок розпилення.

**Наукові положення**

1. Встановлено квадратичну залежність мінімального тиску у соплі Лавалю форсунки від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубків та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на

мінімальний тиск у соплі має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – вхідна витрата води, а мінімальний вплив має значення діаметру вхідного патрубку.

2. Встановлено квадратичну залежність тиску на вході у сопло Лавалю форсунки від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на тиск у вхідному патрубку має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
3. Встановлено квадратичну залежність максимальної швидкості води у соплі Лавалю форсунки від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на максимальну швидкість води має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
4. Встановлено, що за швидкості руху води нижчою за 14 м/с та мінімального тиску більшому за 0,3 атм кавітація у соплі Лавалю форсунки не настає за жодних інших умов. Перші ознаки кавітації починають проявлятися починаючи зі швидкості руху води біля 20-30 м/с та за мінімального тиску 0,1 атм, при швидкості біля 50 м/с і мінімальному тиску 0,05 атм кавітаційні процеси посилюються, а при швидкості більше 100 м/с і мінімальному тиску 0,01 атм спостерігається максимальний вплив кавітації.

## 1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПИЛОПРИГНІЧЕННЯ

### 1.1. Аналіз існуючих систем пилопригнічення

Пилопригнічення - це розбризкування води або вологи на матеріал для того, щоб перешкодити часткам підніматися в повітря, або повітря над матеріалом, та повернути зважені частинки пилу на матеріал.

Велика перевага систем пилопригнічення полягає в тому, що після однієї обробки не потрібно повторної. Пригнічений пил повертається на матеріал і продовжує рух в основному потоці. Також не потрібно додаткове обладнання для повторного оброблення матеріалу.

З метою пилопригнічення застосовується ряд систем, починаючи від технології «садового шлангу» до застосування водних та поверхнево-активних спреїв, піни та туманоутворювачів. Всі ці технології засновані на додаванні матеріалу різного відсотка вологості. На рис 1.1 наведено різні обсяги доданої вологості.

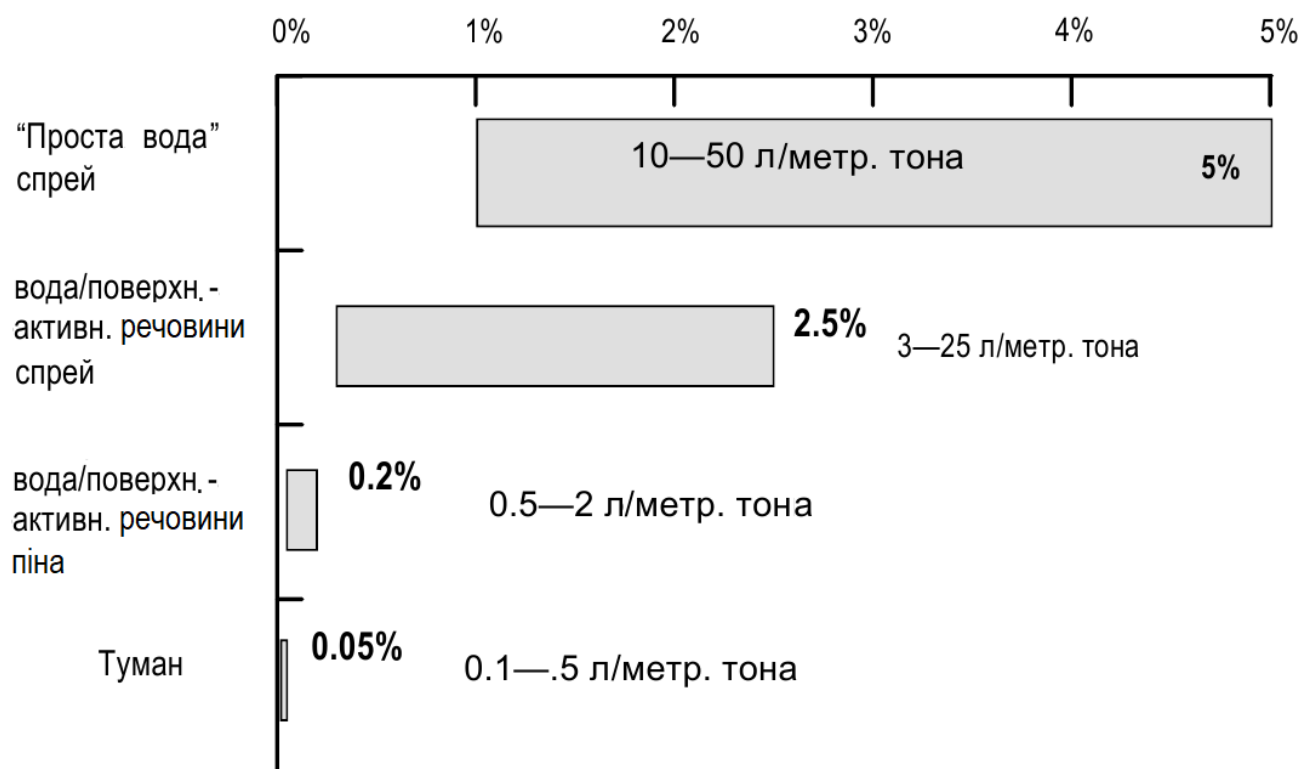


Рис 1.1 – Типи систем пилопригнічення [25]

Пилопригнічення водою можливо, найстаріший спосіб боротьби з пилом – це розбризкування води на матеріал. Після зволоження частинок матеріалу у повітрі або у складі основного потоку, вага кожної частки збільшується і вона не може піднятися у повітря. Вологість також збільшує силу зчеплення матеріалу і утворює більші, важкі групи частинок, які повітряний потік вже не може забрати собою. Розпилювачі здійснюють зволоження матеріалу в тому місці, де матеріал розширюється та вбирає в себе повітря, а саме під час розвантаження з головного барабана на перевантажувальному пункті. Можна також створити водну завісу навколо перевантажувального пункту. При цьому частинки пилу, вступають у контакт із водяними краплями, збільшують вагу та вибувають з повітряного потоку [16 - 24].

Найбільш ефективними спреями вважаються системи із низьким режимом роботи. Спреї з високим режимом можуть додати енергію та збільшити швидкість повітряного потоку та частинок пилу. Таким чином, передана енергія може надати протилежний вплив на повітряний потік та частинки пилу. При великій швидкості повітряного потоку частки пилу залишаються у зваженому стані.

Технічний прогрес постійно вдосконалює прості системи пилоподавлення. Ефективність водних спреїв залежить від швидкісного режиму розпилення, розміру розпилювальної форсунки та розташування розпилювачів.

Прийоми підвищення ефективності пилоподавляючих водних систем включають зменшення розміру утворених крапель, підвищення частоти розпилення, підвищення швидкості крапель чи зниження поверхневого натягу крапель (для швидшого злиття з частинками пилу) [16 - 24].

Спреї на основі простої води – легкі у конструкції та експлуатації, але вода має мінімальний залишковий ефект, після її випаровування ефект пилоподавлення закінчується. Вода недорога, її легко знайти, і вона безпечна для навколишнього середовища та робітників на виробництві.

Системи пилоподавлення на основі води – є відносно простими та не вимагають застосування дорогих камер або капотів. Вони є найбільш дешевими в установці та займають набагато менше місця, ніж пилозбірники. Після запуску

можна провести налагодження з мінімальними витратами та простом. На жаль, у них також є кілька недоліків [7-14].

Через свою об'єднану аеродинаміку, високий поверхневий натяг та великий розмір частинок води не дуже добре з'єднуються з дрібними частинками, тому додавання води для покращення пилоподавлення який завжди призведе до бажаного результату.

Простий водний спрей може здатися самим дешевим засобом боротьби із пилом. У багатьох умовах застосування (наприклад у шахтах) воду застосовують майже задарма і при цьому не потрібно високотехнологічного обладнання. Але економія у витратах може виявитися оманливою. Багато сипучих матеріалів є гідрофобними. Вони мають високу поверхневий натяг і погано з'єднуються з водою. Тоді з метою ефективного пилоподавлення доводиться збільшити обсяг води, але через свої гідрофобні властивості деякі частинки залишаються сухими, інші сильно намокають. Це призводить до проблем у роботі з матеріалом, оскільки він починає налипати на стінки бункера, дефлектори та залишається на звороті стрічки [7-14].

При застосуванні води на конвеєрних системах необхідно пам'ятати аксіому: «менше – отже, більше». Збільшення вологості викликає злипання матеріалу, ускладнює його рух. Надмірне зволоження мінералів перед дробленням може призвести до налипання матеріалу на устаткування та його закупорці. Надмірне зволоження може призвести до пробуксування стрічки або налипання матеріалу в бункері та у всій перевантажувальній зоні.

Якщо матеріал вбере у собі надмірну вологість, він може погіршити роботу, наприклад, на теплостанціях або на інших підприємствах, де потрібна теплообробка, зокрема надмірна вологість вугілля та коксу в котельнях може призвести до збільшення витрати палива та підвищення тарифів на опалення.

Хоча застосування простих водних спреїв здається найбільш економічним способом пилоподавлення через доступність води всюди і можливості не платити за неї, плата за надмірну вологість може виявитися дуже дорогою.

До способів поліпшення пилоподавлення, в яких обмежене застосування

води, відносяться застосування «сухого туману» або комбінованих спреїв, де до води додані хімічні поверхнево-активні речовини, які потім розпорошуються спреєм або у вигляді піни [25].

Хоча застосування простих водних спреїв здається найбільш економічним способом пилоподавлення через доступність води всюди і можливості не платити за неї, плата за надмірну вологість може виявитися дуже дорогою. До способів поліпшення пилоподавлення, в яких обмежене застосування води, відносяться застосування «сухого туману» .

Туманоутворювачі оптимізують застосування води для пилоподавлення. У цих системах використовуються спеціальні форсунки, які утворюють дуже маленькі крапельки, що розпорошуються у вигляді туману. (рис 1.2). У туманоутворювачах застосовуються спеціальні форсунки, які утворюють дуже маленькі крапельки води та розпорошують їх у вигляді туману [25, 26].



Рис 1.2- Туманоутворювачі [25]

Ці краплі змішуються та агломерують з частинками пилу такого ж розміру. В результаті утворюються комбіновані частинки більшого розміру, що осідають на матеріал. Туманоутворювачі практично застосовують властивість частинок контактувати лише з подібними за величиною. Адже якщо водяна крапля занадто велика, дрібні частинки пилу просто проходять повз і навіть відштовхуються навколишнім повітрям. (рис 1.3) [25, 26]

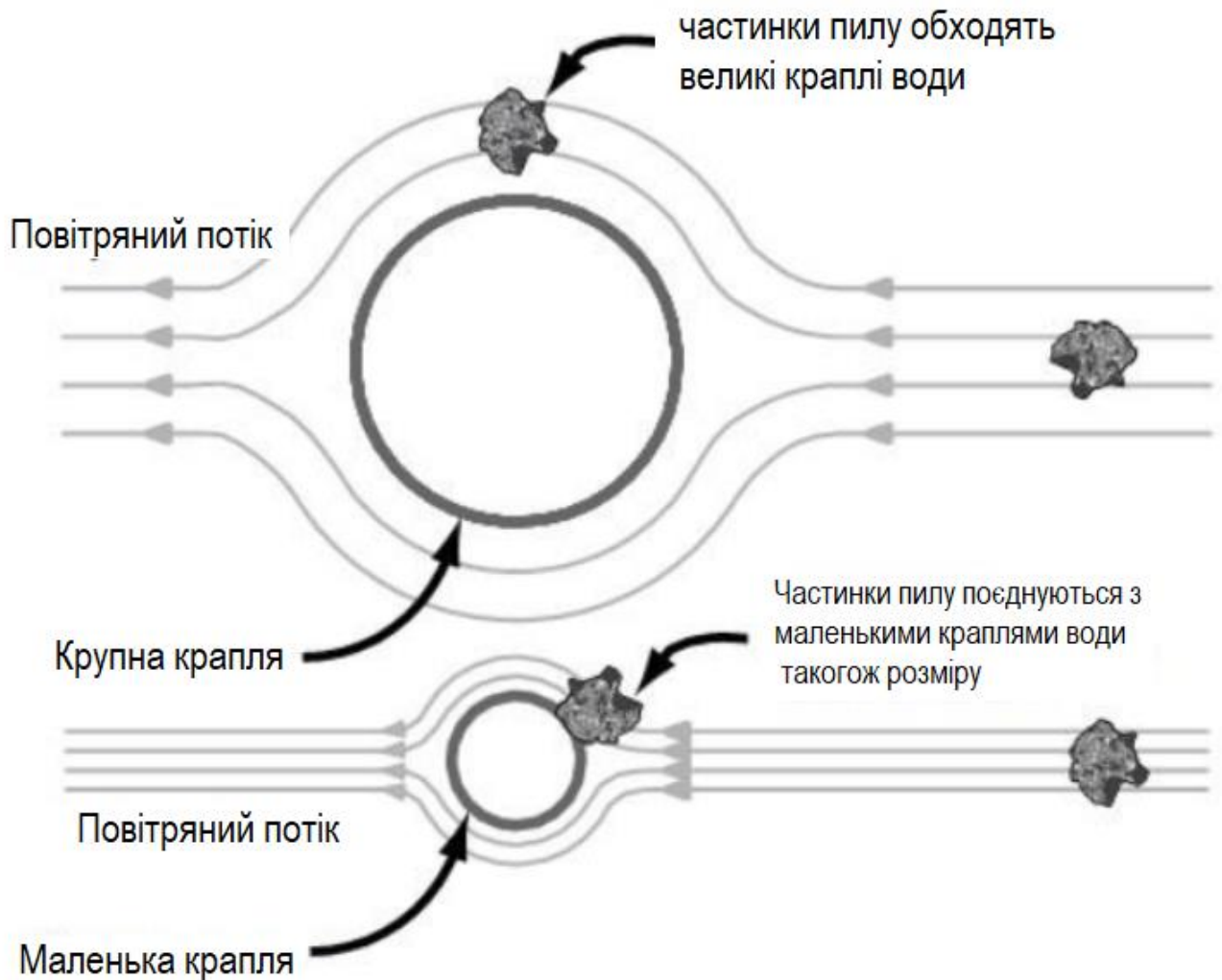


Рис 1.3 – Поєднання частинок пилу та крапель води [25]

Туманоутворювачі розпоршують воду, розбиваючи її на дуже дрібні крапельки, які готові з'єднатися з частинками зваженого пилу такого ж розміру.

Збільшення ваги змушує частки осісти на основному потоці матеріалу. Частинки пилу можуть пропускати великі краплі води, але добре з'єднуються з маленькими крапельками такого ж розміру [25].

Розпилення води знижує поверхневий натяг водних крапель, кількість



крапель на даній площі збільшується і усувається необхідність добавки поверхнево-активних або інших речовин. Невеликий об'єм води, доданої до системи туманоутворювача, - зазвичай 0.01-0.05% від ваги матеріалу, або об'єму менше пінти на тонну - не погіршує характеристики матеріалу.

Існують два способи створення розпорошеного водного туману.

Розпорошення за допомогою двох рідин При першому способі туман утворюється з води та стиснутого повітря. Їх пропускають через подвійні форсунки. Тут стиснене повітря розщеплює потік води на краплинки туману для захоплення пилу. Виробництво та додавання стисненого повітря підвищує витрати на встановлення та експлуатацію системи. Також потрібно взяти до уваги можливі наслідки застосування стисненого повітря. Якщо його ввести в перевантажувальний пункт, він може порушити рівновагу зусиль, оскільки його швидкість стимулюватиме рух пилу [25].

Розпилення за допомогою однієї рідини. У цій системі застосовується дуже тонкий струмінь води, який закачують у форсунки під високим тиском. Тут не потрібне стиснене повітря або інше джерело енергії, крім електричного насоса. Дані форсунки виробляють гідравлічне розпилення для утворення туману. У цій системі вода надходить у маленький отвір під високим тиском і там краплі води розбиваються на мікроскопічні частинки.

Енергія, створювана насосом, розпорошує крапельки води, але не збільшує її швидкість, таким чином мінімізується заміщене повітря. Відсутність потреби у стиснутому повітрі призводить до зниження операційних витрат і полегшує установку. Щоб форсунки не засмічувалися, необхідно перед розпорошенням видалити їх всі тверді частинки. Завдяки невеликому об'єму води, доданої до матеріалу, зробити це досить легко за допомогою звичайних фільтрів або електрофільтрів.

Розташування туманоутворювачів трохи незвичайне, оскільки вони призначені для обробки повітря навколо матеріалу, але не самого шару матеріалу. Внаслідок цього туманоутворювачі встановлюються в кінці перевантажувального пункту. Це місце дозволяє частинкам матеріалу осісти самим, а також встановити

спочатку активні або пасивні системи пилозбірників без ризику забити фільтри вологими частинками пилу. Форсунки, через які надходить туман, встановлюються по всій ширині між бортами бункера. Форсунки повинні кріпитись таким чином, щоб максимально наповнювати камеру туманом. Всі викиди пилу повинні проходити через завісу туману, але туман не повинен розпорошуватися безпосередньо на матеріал. Струмені направляються поверх матеріалу, але не на матеріал.

Розпилення не повинно прямувати ні на яку поверхню, а форсунки повинні бути захищені від засмічення матеріалом, що падає [25].

Плюси та мінуси систем туманоутворювачів. Туманоутворювачі ефективно вловлюють пил і є економічними у плані витрат на встановлення та експлуатацію. Порівняно з традиційними системами пилозбірників, їх операційні витрати також невеликі. Добре сконструйована система туманоутворювачів відмінно запобігає викидам пилу в місці установки і не вимагає застосування хімічних речовин. Це особливо важливо при транспортуванні таких вантажів, як стружка деревини, призначена для виробництва паперу. Застосування хімічних речовин може пошкодити пульпу та знизити якість кінцевого продукту на целюлозно-паперових комбінатах.

Так як у туманоутворювачах використовується одна вода, при їх застосуванні зберігається цілісність процесу. Загалом обсяг доданої води становить 0.01-0.05%. Цей фактор робить туманоутворювачі популярними в тих галузях, де надмірна вологість неприпустима, наприклад у виробництві цементу та вапна. Через маленький отвір форсунки в туманоутворювачах зазвичай застосовується питна вода, тому для видалення з неї зважених твердих речовин необхідно проводити фільтрацію. Якщо вони трапляться у воді, то форсунки можуть засмічитися. Також необхідно у встановлені періоди часу проводити тех. - обслуговування системи подачі води [7-14].

Якщо підприємство знаходиться в умовах холодного клімату, необхідно передбачити опалення водопроводу.

При виборі туманоутворювача слід також враховувати обсяг та швидкість

повітря на відкритій площі навколо перевантажувального пункту або бункера. Як уже говорилося, з урахуванням необхідності контролювати рух повітря на всій площі перевантажувального пункту в цій ситуації доцільніше застосовувати туманоутворювачі, що застосовують розпилення за допомогою однієї рідини (без стисненого повітря). Але щоб туманоутворювачі працювали по-справжньому ефективно, їх потрібно застосовувати у повністю закритій камері, де висока швидкість повітряного потоку знижена до мінімуму. Якщо бункер не закритий, то маленькі частинки пилу та туману можуть виноситися з бункера сильним повітряним потоком повітря, що спрямовується назовні. Туманоутворювачі діють ефективніше, якщо площа їхнього охоплення не дуже велика. Недоліки даної системи полягають у тому, що її застосування потребує певного досвіду та налагодження на місці – їх можна додати до витрат на систему. Ще одна вада полягає в тому, що її застосування на кожному виробництві індивідуальне. Тобто рівень пилу знижується тільки в місці застосування туманоутворювача. Форсунки туманоутворювачів встановлюються по повній ширині завантажувальної зони з бортами. кілька туманоутворювачів. Якщо конвеєрна система дуже велика, туманоутворювачі можуть просто викреслити з кошторису [7-14].

Додавання до води хімічних речовин дуже поширене. Поверхнево-активні речовини – сурфактанти покращують властивості води, знижують загальний обсяг води та зменшують недоліки, пов'язані з надмірною вологістю матеріалу.

Якщо вугільний чи коксовий пил падає у калюжу з водою, то може лежати в ній годинами. Ці матеріали гідрофобні, вони погано поєднуються з водою. Оскільки змінити природу частинок пилу неможливо, то поліпшення сполуки частинок з водою до води додаються хімічні речовини. При додаванні хімічних речовин, зазвичай це сурфактанти – поверхнево-активні речовини, поверхневе натяг водних крапель знижується, і частинки пилу намокають [7-14].

Сурфактанти – це речовини, які при додаванні до води покращують властивість води мочити поверхні та утворювати дрібні краплі. Сурфактанти знижують поверхневий натяг води та долають тяжіння між молекулами води, внаслідок чого покращується краплеутворення.

Крапля води, яку змішали із сурфактантом, наприклад, із засобом для миття посуду, вже не зможе утворити рідкий міхур на тій же поверхні, тому що його поверхневий натяг значно зменшився. «Стінки» боків краплі вже не можуть витримувати її ваги, бо змінилися зусилля, які тримали «стінки». Саме тому поверхнево-активні речовини додаються в пилоподавлювачі. Після додавання сурфактантів поверхня водяних крапель більше не перешкоджає з'єднанню з частинками пилу, і в результаті безладних зіткнень водяних крапель і частинок пилу останні намокають, важчають і падають [7-14].

В даний час використовується велика кількість сурфактантів та їх сумішей. Багато хімічних компаній виробляють продукцію, спеціально розроблену для боротьби з пилом у конкретних умовах. Щоб вибрати правильний продукт та визначити об'єм, який потрібно додати до води, необхідно протестувати сурфактант. Недолік системи пилоподавлення з додаванням сурфактантів полягає в необхідності постійно купувати хімічні речовини. Їх ціна зазвичай варіюються від ½ до 3 центів на тонну матеріалу, що транспортується. З урахуванням амортизації обладнання, витрати можуть бути ще вищими. До того ж системи пилоподавлення потребують постійного тех. обслуговування, яке вносить свій внесок як витрати на робочу силу в постійні витрати [16-24].

Потрібно пам'ятати про те, що на деяких виробництвах не допускається додавання хімічних речовин до матеріалу або процесу обробки матеріалу. Усі хімічні речовини, що додаються в пилоподавлювачі, повинні бути сумісні з виробничим процесом, сипучим матеріалом та обладнанням, включаючи конвеєрну стрічку. Хоча добавка сурфактанту знижує обсяг використовуваної води, проте, змішані спреї можуть додати води більше, ніж потрібно.

Після того, як вибрано реагент, слід вирішити, як його застосовувати по відношенню до матеріалу: у вигляді спрею або піни. Обидві системи мають свої переваги. В цілому обсяг доданої вологи при використанні спрею вище, ніж у піноутворювальній системі. Хоча відсоток розведення в спреях нижчий, ніж у пінних системах пилоподавлення, поширення піни в пилоподавителі більш ефективно, так як до матеріалу додається менше вологи. Останні розробки в

технології сурфактантів удосконалили деякі суміші, і тепер їх ефективно можна застосовувати для пилоподавлення в пінних системах з низьким рівнем додавання вологи. Таким чином, у цих системах знижується вартість за рахунок нижчого відсотка розведення порівняно зі спреями і є перевага у вигляді обмеженого обсягу доданої вологи [16 - 24].

Пінне припинення пилу Використання поверхнево-активних речовин у суміші з водою підвищує ймовірність того, що частинки пилу при зіткненні з крапельками будуть об'єднуватися, і в результаті відбудеться придушення пилу. Наступне завдання, яке постає – це збільшення поверхні, на якій крапельки контактуватимуть з дедалі більшою кількістю частинок пилу.

Деякі постачальники пропонують пінні системи пилоподавлення. При правильному співвідношенні матеріалу та піни ці системи працюють дуже ефективно. Так як волога набуває форми піни, то поверхня для контакту з частинками пилу сильно зростає. Деякі пінні бульбашки притягують і поєднують відразу кілька частинок пилу. Інші пінні бульбашки вибухають і розпадаються на дрібніші, що з'єднуються з такими ж дрібними частинками пилу, які важко вловлюються звичайними бульбашками.

Відсоток доданої вологості в пінних системах пилоподавлення становить 0.05-0.1%. При цьому вони додають на 10% води менше, ніж аналогічні системи спреїв. Таким чином, витрачається одна кварта води на тонну вантажу (трохи більше за літр на метричну тонну). Отже, ці системи популярні на підприємствах з обмеженими поставками води або там, де надлишковий вміст води знижує характеристики матеріалу, як, наприклад, на теплоенергостанціях. І нарешті, зниження обсягу доданої води зменшує проблеми із закупоркою просіювачів та налипанням матеріалу на механічні складові конвеєра та стінки бункера [7-14].

Одні сурфактанти добре утворюють піну. Додавання до них стисненого повітря та пропуск цього з'єднання через змішувач утворює піну. Зміна співвідношення повітря, води, хімічних речовин та інших контрольованих факторів дозволяє генерувати піну в залежності від умов застосування від мокрої до сухої, що нагадує піну для гоління. Хороша піна може збільшити поверхню покриття при

тому самому обсязі води в 60-80 разів. При цьому відсоток доданої вологості зберігається дуже низьким.

Якість води відіграє важливу роль в ефективності пінного пригнічення пилу. Здатність утворювати піну багато в чому залежить від показників води. Щоб переконатися, чи дана вода утворюватиме піну, потрібно проаналізувати наступні характеристики води [25]:

- рН
- провідність
- наявність завислих речовин
- кальцієва жорсткість.

У кожного постачальника сурфактантів є специфікація з даними характеристиками води. На їх основі він підбере відповідний піноутворюючий сурфактант та відсоток розведення. Утворення піни та встановлення піноутворювача Застосування піни як пилоподавлювача починається зі змішування води та піноутворювальної речовини. Вода і хімікат вводяться в дозуючий насос, і суміш, що утворюється, подається в регулятор потоку для живлення системи. Другий регулятор потоку контролює потік стисненого повітря. Розчин і повітря через роздільні шланги надходять до піноутворюючої каністри, де змішуються. Потім піна по шлангах подається в форсунки, що розприскують, укріплені на стінці або стелі бункера. Один дозуючий насос і регулятори можуть жити два пункти пінного припинення пилу на підприємстві.

Хоча на багатьох підприємствах пінне пилоподавлення знаходить успішне застосування, є деякі обмеження для їх використання. У багатьох випадках піна, виготовлена сурфактантами, погано змочує матеріал, що транспортується на даному виробництві. Деякі виробники сурфактантів стурбовані тільки утворенням стабільної піни і не думають, чи зможе вона подолати гідрофобні властивості матеріалу, що транспортується. Тому, перш ніж застосовувати піну, потрібно перевірити, чи досить добре цей хімічний сурфактант змочує матеріал [25]

Для утворення піни потрібне стиснене повітря. Якщо стиснутого повітря немає в даному виробництві, потрібно встановити компресор. Пінна установка є

трохи дорожчим за традиційне обладнання для спреїв і вимагає трохи більше тих. обслуговування.

Нарешті, обсяг сурфактанту, необхідний освіти піни, трохи більше, ніж аналогічний для спрею. (обсяг сурфактанту на дану кількість води вище, але завдяки розширенню піни, обсяг застосовуваної суміші менший, ніж у спреях.

Ще одна технологія пилоподавлення полягає у застосуванні в'язучих засобів для збереження ефекту пилоподавлення на більш тривалі періоди часу. Використання нев'язких сурфактантів дозволяє намочити частинки пилу, щоб вони з'єдналися один з одним або притягнулися до більших частинок і перешкоджали утворенню завислих частинок пилу. Але як тільки вода випаровується, ефект пилепридушення закінчується [25].

У багатьох випадках пилоподавлення потрібно протягом кількох перевантажувальних пунктів, поки матеріал не надійде до сховищ, в залізничні вагони, на баржі або цехи, де не буде потрібне пилоподавлення. Наприклад, вугілля надходить із залізниці на баржі, де зберігається на відкритому повітрі протягом кількох тижнів. Коли він знову потрібний, то може бути дуже сухим і створювати серйознішу проблему пилеобразовання, ніж при первинній обробці. В інших випадках матеріалам, як, наприклад, прожареному коксу або котуни із залізної руди потрібен контроль пилоутворення весь час від пункту виробництва до кінцевого пункту споживання, розташованим у тисячах кілометрів один від одного, і цей період може тривати кілька тижнів. У таких випадках економічніше застосувати в'язучий сурфактант для пилоподавлення, ніж повторювати комбінацію сурфактантів з водою. Існує багато різних в'язучих засобів, які можна підібрати для будь-якого матеріалу [25].

Завдання в'язучого засобу з'єднати частинки пилу у більші та утримувати їх разом після випаровування води. У деяких випадках застосовується гігроскопічний матеріал, такий як хлорид кальцію, який уповільнює випаровування вологи з матеріалу. Перевага цього способу полягає у низькій собівартості.

Більше традиційні в'язучі засоби включають лігнін, танін, смолу, полімери. Їх додають у сурфактанти для змочування частинок пилу, і вони обволікають

укрупнені частинки, а потім діють як клей, який притягує та зв'язує частинки пилю. Успішне застосування цих систем залежить від умов виробництва, де проводиться пилоподавлення, і хорошого перемішування матеріалу для того, щоб дрібні частинки пилю могли з'єднатися з більш великими обробленими частинками [25].

Застосування в'язучих засобів є дорожчим, ніж застосування одних сурфактантів, тому вони використовуються в більш слабкій пропорції розведення. Хоча ціна в'язучих хімікатів на фунт менш дорога, але їх застосовують у пропорції від 50/1 до 200/1 (2% до 0.5%) [25].

При виборі в'язучого засобу необхідно розуміти, який ефект цей засіб вплине на перевантажувальний пункт та конвеєрні стрічки. Якщо в'язучий засіб добре пов'язує пил, він може зробити те саме з обладнанням. Необхідно правильно застосовувати подібні засоби, оскільки розпилення їх на обладнання чи порожню стрічку може призвести до значних проблем у виробництві та експлуатації технічних засобів.

Також потрібно враховувати вплив даного хімікату на довкілля та сам матеріал. Якщо засіб застосовувався до матеріалу, який потім надійшов на відкритий склад, там матеріал може потрапити під дощ. Якщо в'язучий засіб розчиняється у воді, то його частина може змити дощем, і він може забруднити навколишнє середовище. Більшість виробників в'язучих засобів виготовляють лише екологічно безпечні в'язкі засоби, проте це питання необхідно порушити на переговорах з постачальником [35].

Місце розташування пилоподавлювачів При застосуванні тумано- і піноутворювачів, водних і водно-хімічних спреїв місце розташування розбризкуючих отворів і вибір системи пилоподавлення не менш важливі, ніж вибір матеріалів, що пригнічують пил. Навіть найкраща система пилоподавлення приречена на провал, якщо місце пилоподавлення вибрано неправильно, і не забезпечується тісний контакт пилоподавлювача з частинками пилю. Успіх пилоподавлення ґрунтується на змішуванні вантажу та пилоподавлювача на перевантажувальному пункті. Незалежно від того, який пилоподавлювач використовується: просто вода або вода в поєднанні з сурфактантом, у вигляді



спрею або піни, краще розміщувати систему пилоподавлення якомога ближче до початку перевантажувального пункту (і джерелам пилю). У цьому випадку, сили матеріалу, що рухається, втягують пилоподавлювач у потік матеріалу, що йде через перевантажувальний пункт. Наприклад, піноутворювачі завжди діють найбільш ефективно на розвантажувальному пункті дробарки або конвеєра, тому що матеріал дуже динамічний. Застосування пилоподавлювача в цих умовах дозволяє пені глибше проникнути в шар матеріалу і вловлювати окремі частинки, а не лежати поверх матеріалу. Контроль Застосування пилоподавлення за допомогою води та/або хімікатів на перевантажувальному пункті повинно проходити автоматично, щоб вода або хімікати застосовувалися тільки під час руху конвеєра та присутності на конвеєрі вантажу [16-25].

Система контролю має бути простою, як відкриття клапана на садовому шлангу. На іншому кінці цеху може бути комп'ютер для моніторингу та контролю системи пилоподавлення. З ускладненням систем контролю операційні витрати системи боротьби з пилом знижуються.

У складніших системах контролю є велика кількість датчиків, що відстежують всі параметри руху матеріалу, завантаження, раптового викиду пилю, наявність хімікатів, потік повітря і води і навіть відсоток вологості в матеріалі.

Датчики, що визначають різницю між двома матеріалами самі вибирають тип пилоподавлення та швидкість руху матеріалу та автоматично змінюють режим роботи виробництва [16-25].

Постійний контроль дозволяє своєчасно виявляти проблеми викиду пилю та їх зв'язок із рухом потоку матеріалу. Наприклад, у багатьох дробарок дуже низький рівень пилоутворення при повному завантаженні, але рівень пилю неприпустимо підвищується, коли потік матеріалу сповільнюється або припиняється. Застосування тривалого аналізу показує повний вихід пилю, а чи не короточасні піки.

Застосовуючи постійний контроль рівня пилю, можна виявити, де відбуваються короточасні сильні викиди пилю та вжити заходів щодо придушення пилю [16-24].

Технічне обслуговування систем пилоподавлення Також, як автомобіль, системи пилоподавлення потребують тих. обслуговування. Безперечно, найчастіша причина поломок обладнання систем пилоподавлення – це недостатньо хороше обслуговування. Форсунки та фільтри необхідно перевіряти та чистити, рівень хімікатів, швидкість води та повітря необхідно перевіряти постійно, інакше і найкраща система може вийти з ладу.

Деякі постачальники пилоподавлюючого обладнання пропонують тех. обслуговування як частина гарантійного пакета Це рішення дуже зручне для споживачів, оскільки включає безкоштовне обслуговування та робочу силу та гарантує цілісність системи пилоподавлення [16-24].

Такого поняття, як 100% контроль пилоутворення, не існує. Пил є навіть у чистих лаборантських, тому потрібно реалістично оцінювати проблему боротьби з пилом і прагнути досягти хороших показників зниження рівня пилу, замість того, щоб мріяти про виробництво без пилу.

Пилопригнічення найкраще здійснюється в закритих камерах великого розміру. На відкритій площі великих цехів, наприклад, на платформах, що саморозвантажуються, або на відвалах шахт, важко застосовувати пилоподавлення і боротися з пилом.

Щоб досягти прийнятних результатів на цих ділянках рекомендується застосовувати комбіновані системи пилозбору та пилоподавлення.

Взята окремо система пилоподавлення не може вирішити всі питання утворення летких речовин. Але правильний вибір, конструкція та експлуатація разом можуть підвищити ефективність пилозатримання, знизити ризик власного навантаження та перевантаження пилозбірників. Ефективне пилозатримання - це важлива частина піраміди по повному контролю над матеріалом на виробництві [25].

## **1.2. Аналіз промислового пилу та його властивостей**

Промисловим пилом називають дрібні частинки корисних копалин розміром до 1 мм. Промисловий пил різноманітний за складом, властивостями, умовами утворення та впливом на організм людини. У виробничих приміщеннях пил може бути осілим на підлогах, стінах, поверхні обладнання та зваженим у повітряному середовищі. Зважений пил є дисперсною системою, в якій дисперсним середовищем є повітря, а дисперсною фазою — тверді частинки [7-15].

Пил, що знаходиться у зваженому стані у виробничих приміщеннях, є дуже складною системою, яка залежить від багатьох факторів (розміру та форми частинок, щільності, здатності до коагуляції, трибоелектралізації, адсорбції та інших фізичних властивостей).

Промисловий пил класифікують за різними ознаками. По дії, що має вплив на організм людини, пил поділяють на нейтральний, токсичний і силікозний. За походженням пил умовно поділяють на органічний, мінеральний, змішаний.

За розміром дрібнодисперсних частинок розрізняють три основні групи пилу [15]:

- частинки крупністю більше 10 мкм, які осідають у нерухомому повітрі із зростаючою швидкістю і не дифундують;
- пил крупністю від 0,1 до 10 мкм, що осідає у повітрі з постійною швидкістю за законом Стокса і умовно називається «туманом»;
- частинки крупністю менше 0,1 мкм, які перебувають у постійному броунівському русі та енергійно дифундують. Пил такої крупності майже не осідає і за своїми властивостями наближається до молекул газу.

Дрібнодисперсні частинки пилу мають величезну питому поверхню, підвищену фізичну та хімічну активність та адсорбційну здатність.

У табл. 1 наведені дані по масі, обсягу та сумарної поверхні частинок залежно від їхньої крупності [15].

У табл. 2 наведені різні властивості пилу залежно від крупності [15].

Таблиця 1.1 – Залежність маси, об'єму і сумарної поверхні від розміру частинок пилу [15]

Крупність частинок, мм	Число частинок к кулі радіусом в 1 см	Об'єм частинки, см <sup>3</sup>	Маса частинки, г	Сумарна поверхня, мм <sup>2</sup>
0,1	10 <sup>15</sup>	4,188·10 <sup>-15</sup>	8888·10 <sup>-13</sup>	126
1,0	10 <sup>12</sup>	4,188·10 <sup>-12</sup>	8888·10 <sup>-10</sup>	12,6
10	10 <sup>9</sup>	4,188·10 <sup>-9</sup>	8888·10 <sup>-7</sup>	1,26
100	10 <sup>6</sup>	4,188·10 <sup>-6</sup>	8888·10 <sup>-4</sup>	0,126

Таблиця 1.2 – Властивості пилу залежно від крупності [15]

Показники	Розмір частинок, мкм			
	5	0,1-5	0,001-0,1	<0,001
Характеристика частинок	грубодисперсні	тонкодисперсні	колоїдні	молекулярні
Видимість при спостереженні	Видимі неозброєним оком	Видимі під мікроскопом	Видимі під ультрамікроскопом	Невидимі під ультрамікроскопом
Можливість затримки на фільтрах	Затримуються на паперових фільтрах		Не затримуються на паперових фільтрах	
Здатність до дифузії	Не здатні	Майже не здатні	Здатні з малою швидкістю	Здатні
Здатність до проникнення крізь рослинні перегородка (діаліз)	Не здатні	Не здатні	Не здатні	Здатні
Здатність до коагуляції	Не здатні	Здатні	Здатні	Не здатні
Участь у броуновському русі	Не приймають участь	Невелика участь	Приймають участь	Приймають участь

Швидкість осадження дрібнодисперсних частинок пилу в нерухомому повітряному середовищі виробничих приміщень визначається за умов рівності діючих у взаємно протилежних напрямках сил тяжкості та в'язкого опору повітряного середовища згідно із Законом Стокса [15].

У спокійному повітряному середовищі виробничих приміщень для осадження частинок крупністю 10 мкм потрібно 2,2 хв (при висоті падіння 1 м) і частинок крупністю 1 мкм - 3,5 год. Пил крупністю 0,5 і 0,2 мкм відповідно матиме час осадження 11 та 46 год [15].

У виробничих приміщеннях при низхідних та висхідних повітряних потоках, зумовлених різницею температур, роботою рухомих машин і механізмів та

загальнообмінних вентиляційних установок, процес осадження дрібнодисперсних частинок пилу значно ускладнюється.

На процес осадження також впливають форма частинок, вологість повітряного середовища, знак електричного заряду частинки та інші фізико-хімічні властивості пилу та повітряного середовища.

Для зручності технологічних розрахунків пиловловлюючого обладнання аспіраційних вентиляційних та інших установок, промисловий пил поділяють на наступні групи [15]:

- великий пил з частками розміром 100 мкм, який легко випадає з повітряного потоку при невеликих швидкостях (гравітаційне осадження) і відсутня в атмосфері виробничих приміщень. Вона легко відокремлюється від газового потоку в гравітаційних камерах та великих циклонах;
- дрібний пил з частинками розміром від 10 до 100 мкм, який присутній у невеликих кількостях у повітрі робочих приміщень. У більшості випадків дрібний пил уловлюється в циклонах діаметром до 1000 мм, батарейних циклонах, фільтрах і мокрих пиловловлювачах;
- тонкий пил (туман) з частинками розміром 0,1-10 мкм, який важко осідає в спокійному повітряному середовищі з постійною швидкістю. Для уловлювання цього пилу застосовують фільтри;
- дуже тонкий пил (дим) з частками розміром менше 0,1 мкм, не осідає під дією гравітаційних сил і постійно перебуває в броунівському русі. Уловлювання її може бути здійснено в ефективних багатозонних електрофільтрах.

На практиці пил характеризують дисперсним складом, необхідним для розрахунку аспіраційних вентиляційних установок та здійснення інших санітарно-оздоровчих заходів на промислових підприємствах [15].

Дисперсний склад пилу характеризується розмірами пилових частинок (мкм) або їх швидкістю витання (см/с) [15].

Дисперсність пилу поділяють такі групи:

Групи	I	II	III	IV	V	VI
Розмір частинок, мкм	5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60	60

Відсотковий вміст фракцій крупністю  $> 40$  мкм зазвичай визначаються ситовим аналізом, а фракцій крупністю  $< 40$  мкм - повітряною класифікацією або седиментацією в різних рідинах. Розмір та форму частинок визначають під мікроскопом [15].

Найбільш небезпечними для людини є частки крупністю  $>0,2 - 5$  мкм. Дослідженнями встановлено, що максимальна кількість частинок цього розміру затримується у тканинах легень.

Частки крупністю нижче  $0,2-0,3$  мкм мають вже колоїдні властивості і стають нешкідливими для організму людини. Вони також можуть видалятися з легенів разом з повітрям, що видихається.

Пил крупністю понад  $5$  мкм у легені практично не проникає, а затримується у верхніх дихальних шляхах і видаляється звідти при чханні та відхаркуванні. При тривалому впливі пил викликає ушкодження слизових оболонок верхніх дихальних шляхів [15].

При великій концентрації пилу у повітрі та ослабленні діяльності верхніх дихальних шляхів пил може проникати в альвеоли, внаслідок глибоких вдихань та видихань при важких фізичних роботах.

Впливу пилу піддаються також інші органи людини. Так, наприклад, пневмокніозні ознаки на рогівці ока з'являються раніше, ніж зміни у легенях; вони хіба що попереджають про небезпеку організму людини. Пневмокніозні запалення рогівки викликаються частинками крупністю нижче  $5$  мкм. При дії великих частинок з великими швидкостями руху ми маємо справу з суто механічними травмами [15].

Пневмокніоз рогівки спочатку проявляється болем, сльозоточенням і світлобоязню, а у поєднанні з алергічними змінами призводить до ерозій та сильного ослаблення зору. Для пневмокніозного запалення повік характерна зміна кольору шкіри, яку неможливо усунути промиванням.

Шкідливому впливу пилу також піддається шкіра. Пил подразнює шкіру (особливо при потіння), що може призвести до розвитку раку шкіри.

Захворювання на пневмоконіоз залежить від індивідуальних нахилів організму людини. Встановлено, що у запиленій атмосфері пневмоконіоз розвивається в середньому за 5-8 років [15].

У деяких випадках за слабкої стійкості організму хвороба настає протягом 6 місяців.

Встановлено, що нейтральний пил діє на організм людини механічно. Разом з тим велика кількість осілого нейтрального пилу може сприяти розвитку різних хвороб (туберкульоз та ін.).

Осілий у лімфатичній системі пил полегшує атакуючу дію на організм бактерій, грибків та паразитів. Різні болючі реакції організму виникають внаслідок абсорбції пилу, незалежно від його крупності.

Вугільний пил інертний; проте великі кількості її можуть просочувати легеневу тканину. З часом таке просочення може зменшити паренхіматозну тканину [15].

Скляний пил викликає запальний стан дихальної слизової оболонки та призводить до тяжких ушкоджень дихальних шляхів. Пил заліза та подрібненого в порошок стали нешкідливими, оскільки не містить кварцових сполук.

Розчинні неорганічні пилу магнію та селену викликають тимчасові порушення функцій організму. Пил нікелю та кадмію викликає реакції у легенях та судинах. До токсичної відноситься пил з'єднання барію, що викликає гострі місцеві запалення легень або хронічні легеневі явища. Дуже шкідливим є пил свинцевих сполук, що абсорбується дихальними шляхами і викликає сильне отруєння організму людини [15].

### **1.3. Аналіз конструкцій обладнання гідрознеплення**

Найбільш інтенсивними осередками пиловиділення в дробильних цехах є приймачі для подрібненого матеріалу на стрічкових конвеєрах після дробильного обладнання, а також його навантаження зі стрічки на стрічку.

Застосування в місцях пиловиділення найбільш досконалих укриттів, що аспіруються, не завжди дозволяє повністю запобігти виносу пилу у виробничі приміщення. У цих випадках, коли дозволяє технологічний процес, рекомендується застосовувати гідропарознепилення. Під гідро-парознепиленням слід розуміти зволоження матеріалу та придушення пилової хмари за допомогою розпорошеної води або пароводяного туману [16-18].

До гідрознепилення можна віднести також туманоутворення в приміщенні, мокре прибирання пилу та підтримання підлоги у вологому стані.

При зволоженні сипучого матеріалу різко знижується виділення пилу. Для різних матеріалів за певної вологості процес виділення пилу практично зводиться до мінімуму. Так, наприклад, для кварциту ця вологість становить 2%, а для шамоту, азбесту та залізної (мідної) руди відповідно 3,5 4-8%. Для залізняка пиловиділення різко скорочується при вологості 4%.

Оптимальна вологість залежить від гранулометричного складу матеріалу. Так, для залізняка крупністю 0-3 мм виділення пилу припиняється при вологості 4,5-6,0% і для руди круїністю 0-25 мм - при вологості 4,0%.

Матеріал зволожують водою, парою чи пароводяним туманом.

Витрати води на зволоження матеріалу визначають за формулою, кг/с [15]

$$q = \frac{W_2 - W_1}{100} G \quad (1.1)$$

де  $W_1$ ,  $W_2$  - відповідно початкова та оптимальна вологість, %;  $G$  – продуктивність технологічного обладнання, кг/с.

З урахуванням випаровування розрахункову витрату води збільшують на 20—25%. Для гідрофобного матеріалу та пилу краще змочування та коагуляція пилу досягається пароводяним туманом. Для зволоження матеріалу рекомендується застосовувати перфоровані труби або високопродуктивні форсунки.



Ефективне змочування, коагуляція та осадження пилу досягається тонкоструктурним диспергуванням рідини (пара) форсунками або туманоутворювачами. При цьому розрізняють кінематичну, гравітаційну та броунівську коагуляцію дрібнодисперсних частинок пилу.

Кінематична коагуляція відбувається при зіткненні частинок пилу, що рухаються з великою швидкістю, і крапель рідини в активній зоні факела.

Гравітаційна коагуляція має місце в результаті зіткнення порошин з краплями рідини, що падають під дією гравітаційних сил тяжіння [15].

Броунівська коагуляція між дрібнодисперсними порошинками та краплями відбувається під дією молекулярних сил.

Коагуляція та ефективність осадження пилу при зрошенні залежать від дисперсного складу, концентрації та щільності пилу, ступеня його змочуваності, а також щільності, в'язкості, поверхневого натягу та питомої витрати рідини.

Ступінь змочуваності підвищується при додаванні до рідини поверхнево-активних речовин (змочувачів ДБ, ВП-10 та ін.) [15].

Гідрофільний пил у порівнянні з гідрофобною ефективніше змочується, коагулює та відокремлюється від газового потоку. Оптимальні параметри зрошення для різних пилів поки що не встановлені. Відомо, що ефективність змочування та коагуляція в основному залежать від розміру, відносної швидкості крапель та питомої витрати рідини. При зрошенні вода диспергується спеціальними форсунками, що характеризуються кутом розчину та активною зоною дії факела. Смолоскипи форсунок можуть бути щільними по всьому перерізу або зонтичними із щільними ділянками по периферії [15].

Для знепилення застосовують механічні та комбіновані дії форсунки з диспергуванням рідини стисненим повітрям. У механічних форсунках вихрової та ударної дії отримують грубе диспергування рідини (50-120 мкм).

Швидкість рідини в соплі форсунки розраховують за формулою [15]

$$v = \frac{4q}{\pi d^2 \varepsilon} \quad (1.2)$$

де  $q$  - витрата рідини,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $d$  - діаметр сопла,  $\text{м}$ ;  $\varepsilon$  - коефіцієнт заповнення сопла форсунки рідиною (для парасолькових та конусних форсунок коефіцієнт відповідно дорівнює 0,16-0,51 і 0,6-0,1).

Для зрошення пилових хмар водою та паром рекомендується застосовувати (рис. 1.4) [15]:

- при зрошенні водою - уніфіковані форсунки КФ-2,2-15 та КФ-3,3-40, парасолькові типу ЗФ-1,6-75 та плоскоструминні типу ПФ-1,6-40;
- при зрошенні паром – насадку Н-2,2;
- при зрошенні пароводяним туманом – форсунки Ф-2.

Технічна характеристика форсунок наведена у табл. 1.3.

Високим ступенем диспергування (0-5-25  $\mu\text{м}$ ) відрізняються зрошувачі комбінованої дії (туманоутворювачі) з використанням стисненого повітря.

Таблиця 1.3 – Технічна характеристика форсунок [15]

Показники	Тип форсунок					
	КФ-2,2-15	КФ-3,3-40	ЗФ-1,6-75	ПФ-1,6-40	Н-2,2	Ф-2
Тиск води, $\text{мН}/\text{м}^2$	0,4	0,4	0,4	0,4	-	0,1-1,1
Витрата води, л/хв	4,4	6,6	3,2	3,2	-	0,8-1,2
Тиск пара, $\text{мН}/\text{м}^2$	-	-	-	-	0,05	0,1-1
Витрата пари, л/хв	-	-	-	-	2	4-5
Дальнобійність, м	1,5	0,7	1,1	2	4	3-4
Форма факелу	Суцільний конус		Повний конус	Плоский веср	Компактний струмінь	Повний конус
Кут розвору факелу, град	15	40	75	40	0	-

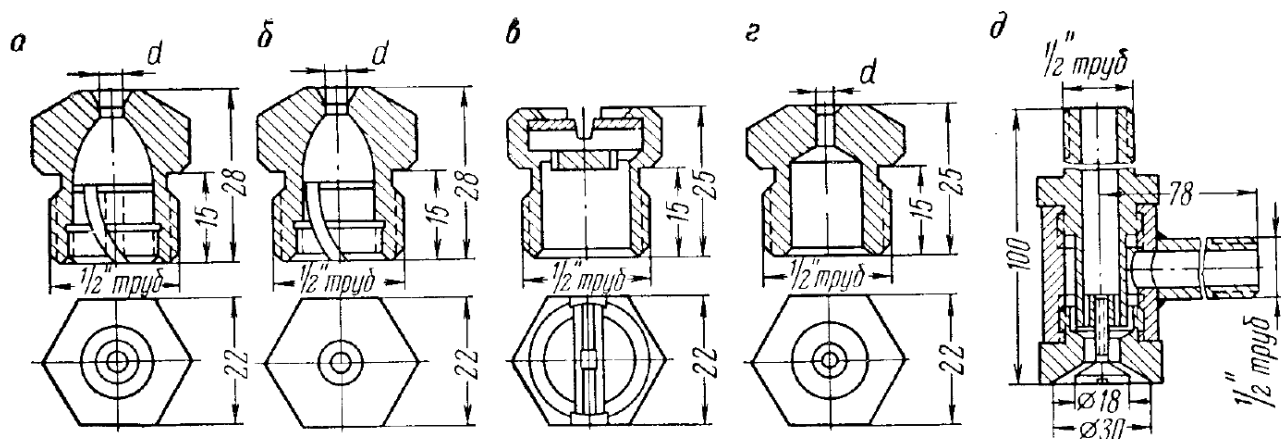


Рис 1.4 – Конструкції форсунок для зрошення [15]: а – форсунки типу КФ; б – форсунка типу ЗФ; в – форсунки типу ПФ; г – насадки типу Н; д – пароводяні форсунки типу Ф-2

Найбільш раціональними конструкціями є туманоутворювачі ТК-1, ТЗ-1 та зрошувачі ОК-1, ОЗ-1 та ОЗ-3.

Технічна характеристика туманоутворювачів наведена в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 - Технічна характеристика туманоутворювачів [15]

Показник	Тип зрошувачів			
	ТК-1	ОК-1	ОЗ-1	ОЗ-2
Витрата стисненого повітря, м <sup>3</sup> /с	0,02-0,05	-	-	-
Витрата води, м <sup>3</sup> /с	0,38-0,81	-	-	-
Тиск, МН/м <sup>2</sup>				
Стисненого повітря	0,5	-	-	-
води	0,5	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4
Довжина факелу, м	13-14	4,5	2	3-5
Діаметр факелу, м	2,5	2,5	2	2
Кут розв'язу факелу, град	-	1,3	2,1	1,4
Діаметр отвору сопла, мм	-	4	4	4
Маса, кг	1,7	0,1	0,06	0,06

Зрошувачі, що застосовуються для придушення хмари пилу, повинні встановлюватися в укриттях далеко від повітровідсмоктувальних патрубків таким чином, щоб краплі води або туману пароводяного не потрапляли в повітропроводи аспіраційних систем. Досягається це також додатковою установкою в укриттях відбійних пластин, що змінюють напрямок руху повітряних потоків з осадженням крапель на поверхні.

У дробильно-сортувальних цехах зволоження матеріалу та придушення пилових хмар рекомендується проводити у верхній частині приймальних бункерів у місцях скидання матеріалу; при завантаженні та перевантаженні матеріалу з колосникових грохотів; в середині вирв для розвантаження руди з конвеєра на конусну дробарку.

#### 1.4. Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження

**Метою роботи** є покращення режиму роботи системи пилопригнічення за рахунок обґрунтування раціональних параметрів форсунок розпилення.

**Об'єкт досліджень** – процес гідравлічного пилоподавлення.

**Предмет дослідження** – параметри форсунок розпилення.

Задачі дослідження:

1. Аналіз шляхів удосконалення конструкції форсунок задля підвищення ефективності пилоподавлення;
2. Дослідження форми сопла прямої форсунки пилопригнічення;
3. Порівняльне дослідження конструкцій прямих форсунок пилопригнічення;
4. Розробка конструкції форсунки підвищеної ефективності.

## **2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРСУНОК ПИЛОПРИГНІЧЕННЯ**

### **2.1. Загальна методика досліджень**

Задля досягнення мети роботи, що полягає у покращенні режиму роботи системи пилопригнічення за рахунок обґрунтування раціональних параметрів форсунок розпилення, планується проведення наступних досліджень.

На першому етапі планується проведення аналізу існуючих конструкцій форсунок з метою визначення шляхів удосконалення конструкції форсунок та підвищення ефективності пилоподавлення.

На наступному етапі планується проведення дослідження форми сопла прямої форсунки пилопригнічення з метою визначення найсприятливіших умов для створення тонкодисперсного розпилення води.

Визначивши раціональні параметри сопла форсунки, проводиться порівняльне дослідження конструкцій прямих форсунок задля визначення основних закономірностей розпилення води.

На останньому етапі розробляється конструкція форсунки підвищеної ефективності.

### **2.2. Аналіз шляхів підвищення ефективності форсунок пилопригнічення**

Метою винаходу [1] є підвищення ефективності придушення за рахунок отримання конусної форми факела і зниження засмічуваності форсунки.

Це досягається тим, що вхідний та вихідний канали розташовані співвісно, а пружина встановлена у вхідного каналу між вкладишем і фільтр-шайбою, при цьому замикаючий елемент жорстко з'єднаний з кінцем пружини, розташованим у фільтр-шайби, а площа поперечного перерізу замикаючого елемента у вихідному каналі форсунки менше площі поперечного перерізу вихідного каналу.

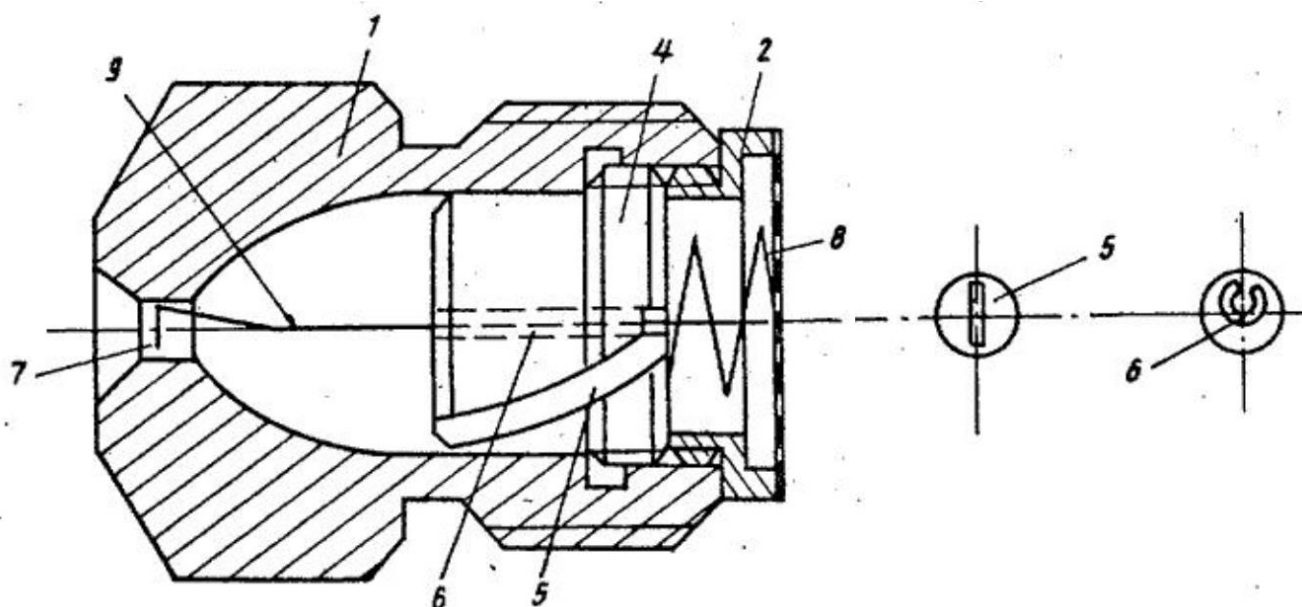


Рис 2.1 – До патенту [1]

Форсунка складається з корпусу 1, до вхідного каналу якого приєднується опорна шайба 2 з фільтром 3 за допомогою різьблення. Між опірною шайбою з фільтром і циліндричною емблемою 4 з пазами 5 і центральним отвором 6, розташованим співвісно вихідному каналу 7 встановлена пружина 8, яка своїми кінцями упирається в опорну шайбу з фільтром з одного боку і у вкладиш - з іншого. Кінець пружини 8, розташований біля опорної шайби 2 з фільтром 3 жорстко з'єднаний з замикаючим елементом 9, що проходить всередині пружини і через центральний отвір вкладиша, протилежний кінець якого знаходиться у вихідному отворі 7 форсунки, може в ньому вільно перемішатися і виконаний, наприклад, з дроту, з поперечним перерізом у вигляді петлі або прямокутника, при цьому площа поперечного перерізу замикаючого елемента у вихідному каналі форсунки менше площі поперечного перерізу вихідного каналу.

Працює форсунка в такий спосіб. Рідина під тиском надходить в корпус форсунки 1 через вхідний канал, пази 5 і центральний отвір 6 вкладиша 4 і стікає через вихідний отвір 7, при цьому замикаючий елемент 9 виходить з форсунки і не істотно впливає на форму факела. Коли підводної магістралі відсутній тиск рідини, замикаючий елемент 9, перекидає вхідний канал 7 запобігає попаданню великих

настиг порівнянних з діаметром вихідного отвору, корпус форсунки з боку останнього.

У разі попадання у форсунку частинок, порівнянних з половиною діаметра вихідного каналу і розклинювання її там, при подачі зрошувальної рідини під тиском на частинку буде діяти сила, що виштовхує її з форсунки, при цьому частка буде тиснути на замикаючий елемент 9, пов'язаний з пружиною 8 яка стискаючись виштовхує частинку разом з замикаючим елементом форсунки.

Використання форсунки дозволить підвищити ефективність п'єпридушення за рахунок отримання конусного факела рідини, що розпилюється, з одночасним запобіганням засмічування форсунки.

Мета винаходу [2] - підвищення ефективності подавлення пилу за рахунок зниження бризгоносу.

Вказана мета досягається тим, що куточки кутової решітки виконані з розмірами, що забезпечують повне перекриття щілинного зазору між суміжними пластинами пластинчастої решітки, при цьому згадані пластини виконані з гладкими стінками тонколистової сталі.

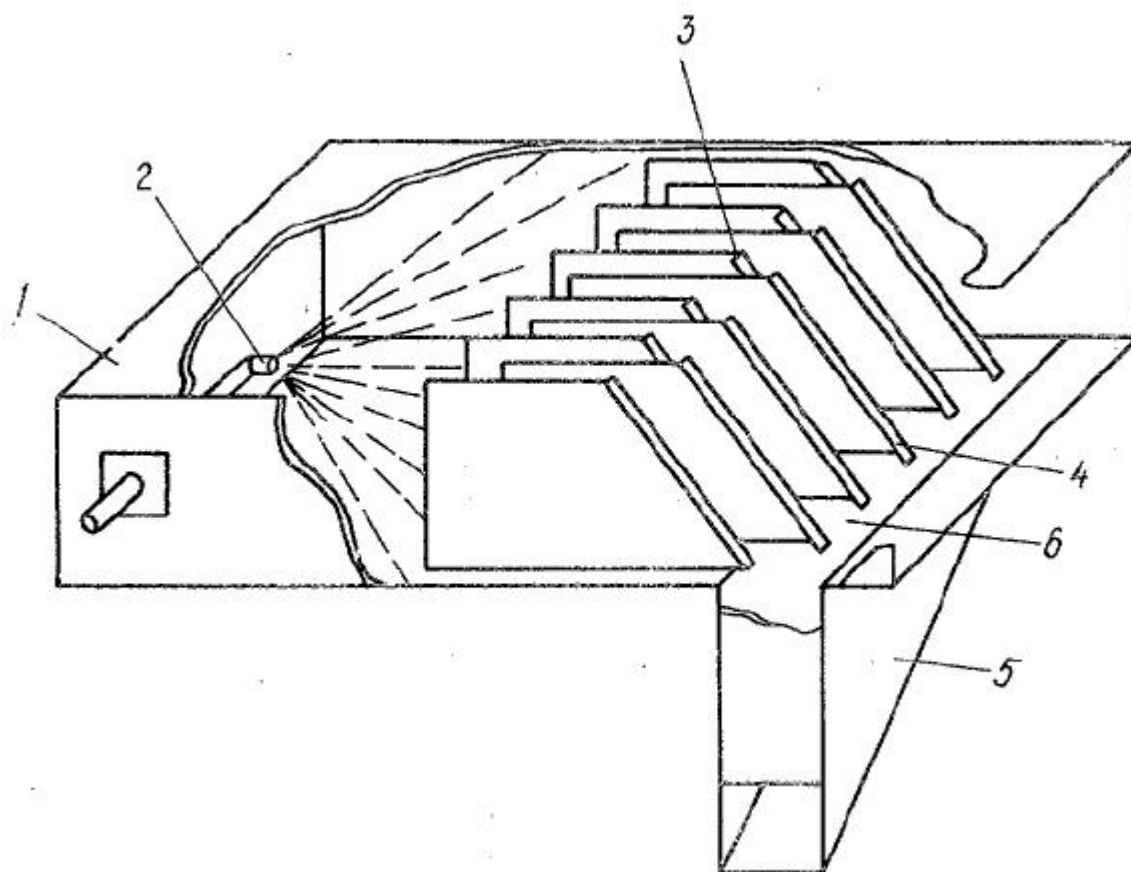


Рис 2.2 – До патенту [2]

Пристрій складається з корпусу 1, форсунки 2, пластинчастої решітки 3 і кутової решітки 4, розташованих в порожнині корпусу 1, і шламозбірника 5. У дніще корпусу виконано отвір 6 для сполучення кутової решітки зі шламозбірником. Пристрій працює наступним чином. Під час роботи форсунки 2 смолоскип розпиленої води ежектує (засмоктує) в корпус 1 запилене повітря, пилові частинки якого зволожуються спочатку в самому факелі розпиленої води, а потім в щілинному просторі між пластинами пластинчастої решітки 3, де відбувається інтенсивна турбулізація потоку, що супроводжувалася зволоженням всіх порошин і налипанням крапельок, що утворилися, шламу на бічні стінки пластин, по яких шлам повітряного потоку рухається до вихідної частини корпусу пристрою. При підході до кінцевої частини пластин шлам відводиться за допомогою куточків кутової решітки 4 через отвір 6 в шламобсрник 5. Знепилене і зневоднене повітря викидається з вихідного отвору корпусу 1 в навколишнє середовище.



Розміщення шламівідвідних куточків на скошених кромках пластин та повне покриття ними щілин між зволожувальними пластинами забезпечує практично повне уловлювання та відведення крапель шламу, що підвищує ефективність пилоподавлення та дозволяє усунути перезволоження корисних копалин та конвеєрних стрічок.

Мета винаходу [3] - підвищення ефективності пилоподавлення за рахунок перетікання запиленого повітряного потоку, що ежектуються, із зовнішньої зони до центру корпусу.

Зазначена мета досягається тим, що відомий пристрій забезпечений змішувачем виконаним у вигляді труби, розташованої всередині корпусу співвісно з ним і має отвори на поверхні від її вхідного отвору до перерізу, в якому розташовані ежектирунція форсунка.

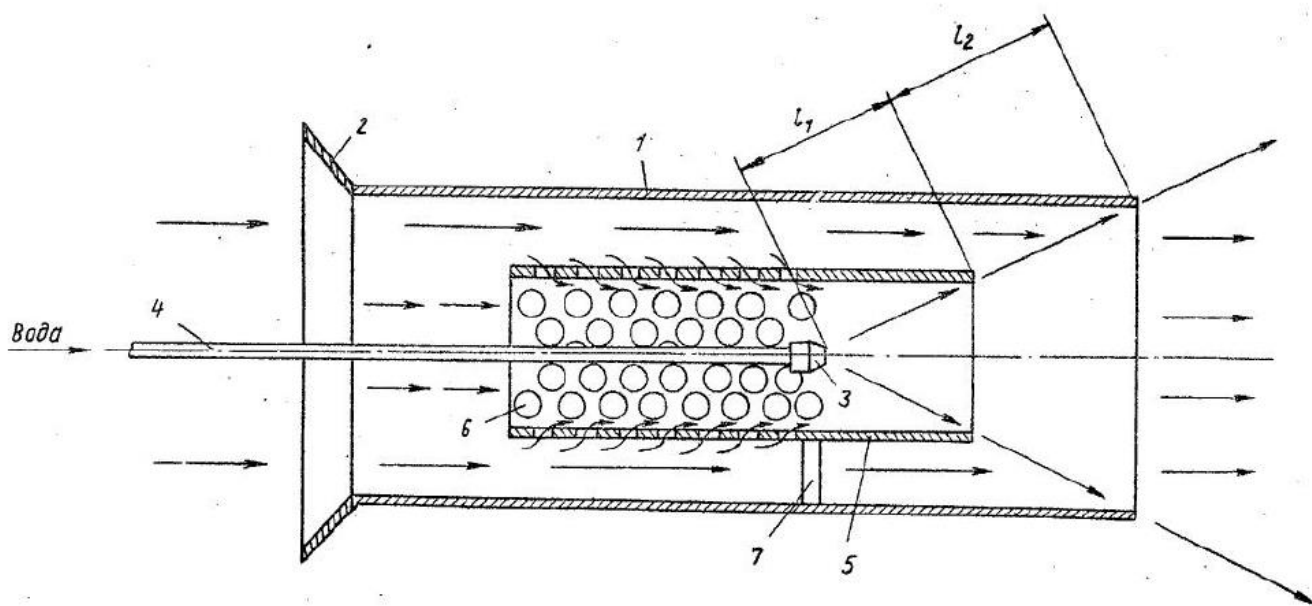


Рис 2.3 – До патенту [3]

Пристрій складається з циліндричної труби 1, яка з боку входу забезпечена колектором 2. Всередині труби 1 співвісно з нею встановлені форсунка 3, що з'єднується з водопідвідним трубопроводом 4, і змішувач, виконаний у вигляді співвісно встановленої додаткової труби 5, яка з боку входу запиленого потоку забезпечена отворами 6, виконаними до перерізу форсунки 3. Труба 5 жорстко

закріплюється на розпірках 7.

Пристрій працює наступним чином.

Пристрій для пилоподавлення кріпиться таким чином, щоб колектор 2 був спрямований в місце максимальної концентрації дрібнодисперсного пилю, а вихід труби 1 - в місце максимального пилоутворення. Водопідвідний трубопровід 4 підключається до високонапірного насоса (не показаний) і вода, виходячи під високим тиском з форсунки 3, створює розрідження всередині труби 5 і в просторі між трубами 1 і 5, внаслідок чого запилений потік повітря засмоктується через колектор 2 циліндричну трубу 1. У зв'язку з тим, що на ділянці 2.) швидкість води більша, ніж на ділянці 11, тиск повітряного потоку всередині труби 5 нижче, ніж між трубами 1 і 5. Тому від повітряного потоку, що рухається між трубами 1 і 5, відокремлюється частина повітряного потоку і перетікає по отворах у трубу 1. На ділянці відбувається інтенсивне утворення шламоводоповітряної суміші за рахунок великих швидкостей води та повітря. На ділянці 12 шламоводоповітряна суміш, що утворилася на ділянці 2,) , змішується з запиленим повітряним потоком, що рухається в просторі між трубами 1 і 5, а потім прямує в осередок пилеутворення шамоводоповітряна суміш, яка містить максимальний вміст шламу.

Використання винаходу дозволяє підвищити ефективність пилеподавлення за рахунок збільшення коагулювання пилю всередині пристрою, підвищити безпеку ведення прохідницьких і очисних робіт, а також поліпшити і санітарно-гігієнічні умови праці гірників.

Мета винаходу [4] - підвищення, ефективності пьспридушення.

Ця мета досягається тим, що у форсунці, що включає корпус і вставку з центральним каналом, вставка виконана з додатковими, зміщеними щодо осі корпусу каналами і забезпечена профільованою напрямною, встановленою з можливістю подовження внутрішніх стінок додаткових каналів.

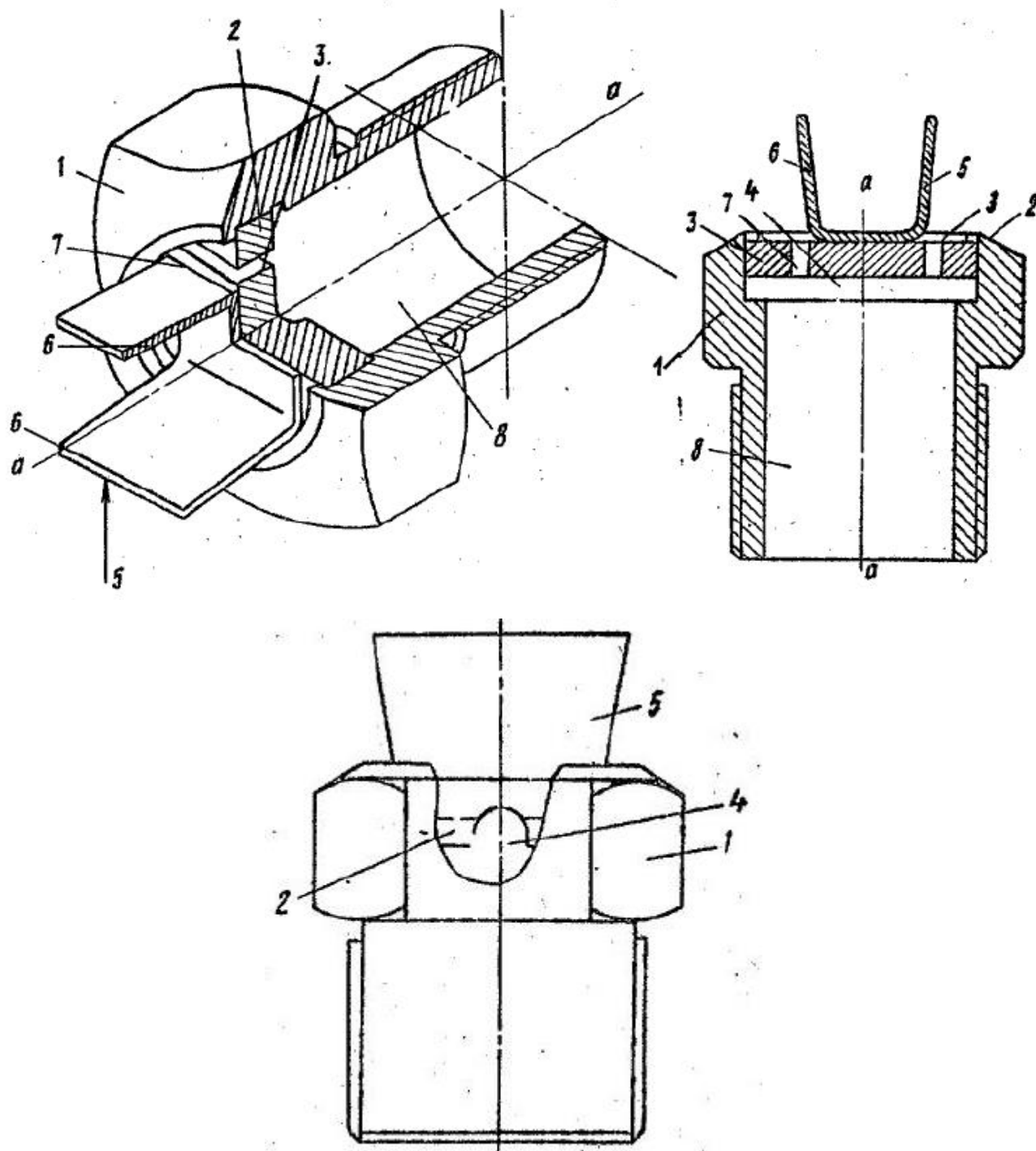


Рис 2.4 – До патенту [4]

Форсунка містить корпус 1, який має розміщену в ній вставку 2 з додатковими каналами 3 і центральним каналом 4, які розташовуються перпендикулярно один одному, причому додаткові канали 3 зміщуються щодо осі а-а форсунки. Форсунка забезпечена також профільованою напрямною 5, стінки якої є продовженням

внутрішніх стінок 7 додаткових каналів .3. Підведення рідини здійснюється через канал 8 у корпусі 1 форсунки.

За допомогою каналів 3 і центрального каналу 4 вставки 2 відбувається формування плоских струменів (не одного, як у наявних форсунках), а для поліпшення формування факела та кращого його напрямку на вставці 2 закріплена профільована напрямна 5, за допомогою стінок 6 якої відбувається поліпшення напрямку потоку рідини на стінки плоский ежектор.

Таким чином, рідина, потрапляючи в канал 8 корпусу 1 форсунки, направляється до центрального каналу 4, через нього потрапляє перпендикулярно до нього розташовані додатково канали 3, де відбувається утворення плоских факелів рідини, що виходять з форсунки. Стінки у профільованій напрямній 5 як би продовжують довжину пробігу рідини по додаткових каналах 3 і сприяють спрямованому формуванню факела форсунки, зіткнувшись з якими плоский факел рідини відкидається на стінки ежектора.

Використання пропонованої форсунки в ежекторах дозволяє підвищити надійність роботи та ефективність пилоподавлення при одночасному зменшенні витрати води в два рази в порівнянні з існуючими типовими зрошувальними пристроями, що призводить до значної економічної ефективності системи пилоподавлення за допомогою ежекторів.

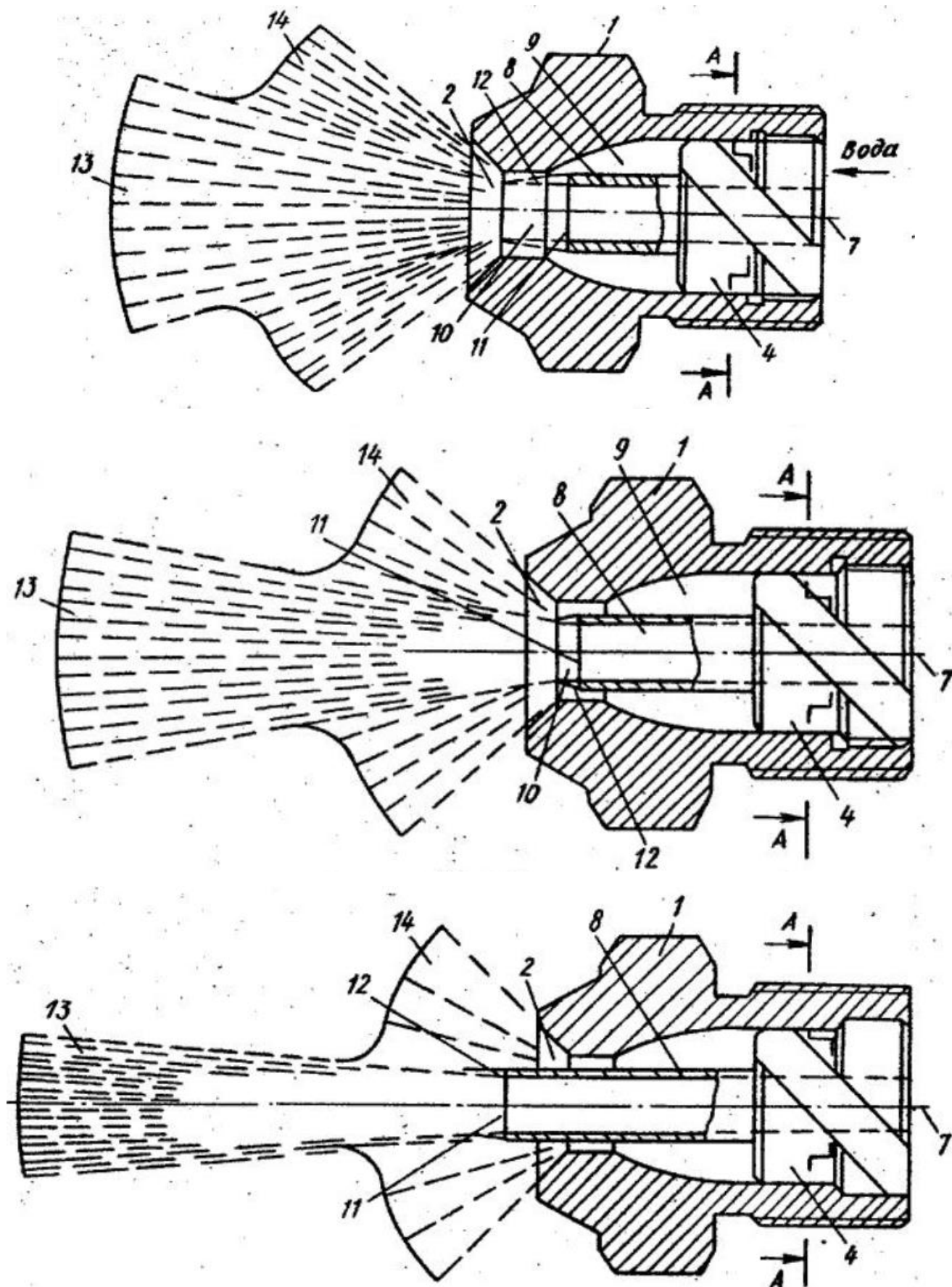
Мета винаходу [5] - підвищення ефективності пилоподавлення за рахунок забезпечення регулювання щільності водяного факела шляхом підвищення щільності факела в центральній його частині.

Це досягається тим, що у вихровій форсунці, що включає корпус з вихідним отвором і вкладиш і з центральним отвором і зовнішніми похилими пазами, вкладиш виконаний з напрямною щаблем і з боку вихідного отвору забезпечений трубчастим насадком, який встановлений з утворенням кільцевого простору між зовнішньою поверхнею і напрямною щаблем вкладиша, при цьому зовнішній діаметр трубчастого насадка і діаметр напрямного ступеня вкладиша знаходяться у співвідношенні

$$0,3 < d / D < 0,7,$$

де  $d$  - Зовнішній діаметр трубчастого насадка;

$D$  - діаметр напрямної щаблі вкладиша.



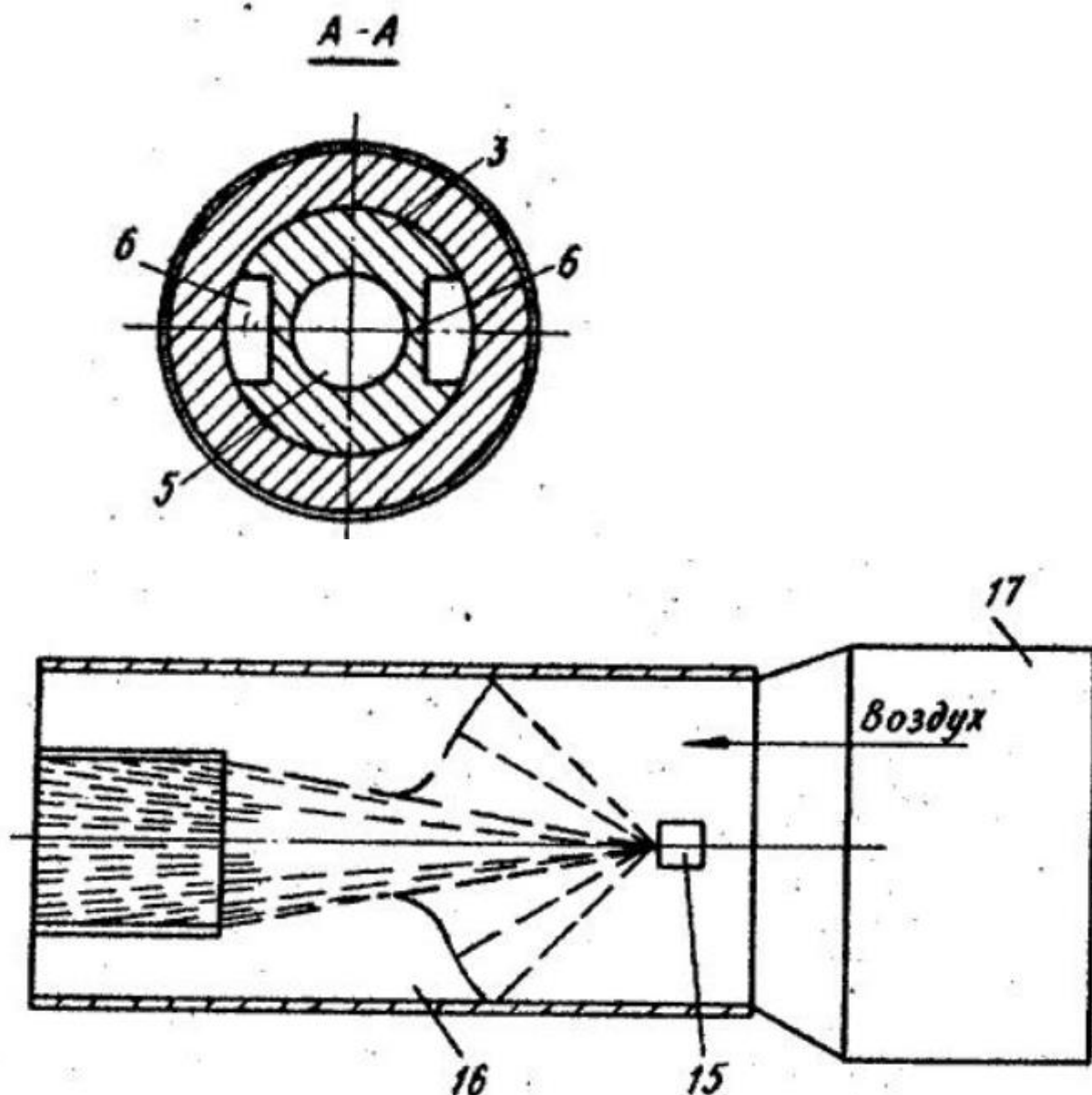


Рис 2.5 – До патенту [5]

Вихрова Форсунка для пилоподавлення містить корпус 1 з вихідним отвором 2 і вкладиш 3. Вкладиш 3 має напрямну ступінь 4 і центральний отвір 5. На зовнішній поверхні вкладиша 3 є зовнішні вихроутворюючі пази 6, нахил яких до поздовжньої осі 7 форсунки для обертання вода, що проходить через зовнішні вихрообразуючі пази 6. Вкладиш 3 з боку вихідного отвору 2 корпусу 1 забезпечений трубчастим насадком 8, наскрізний отвір в якому є продовженням центрального отвору 5.

Трубчастий насадок 8 може виконуватися різної довжини і відповідно до довжини розташовуватися всередині корпусу 1, всередині вихідного отвору 2, або

виходити через вихідний отвір 2 за межі корпусу 1, бути нерухомим уздовж корпусу 1 або переміщатися, мати циліндричну форму зовнішньої поверхні або будь-яку іншу, наприклад конічну або криволінійну, але, незалежно від його форми та розмірів, він призначений для перерозподілу щільності водяного факела за рахунок зниження щільності водяного факела на периферії та збільшення щільності водяного факела в його центральній частині вздовж поздовжньої осі 7, що дозволяє в залежності від його довжини змінювати форму водяного факела, що утворюється, і його щільність.

Вихрова форсунка для пилоподавлення працює наступним чином.

При приєднанні вихрової форсунки до водяного ставу вода під дією тиску надходить у центральний отвір 5 і зовнішні вихроутворюючі пази 6 вкладиша 3. Вода, що виходить з центрального отвору 5, має поступальний рух. Вода, що виходить із зовнішніх вихроутворюючих пазів 6, крім поступального має також обертальний рух. Водяний потік 9, що виходить із зовнішніх вихроутворюючих пазів 6, трубчастим вихровим насадком 3 заданою мірою ізольований від водяного потоку 10, виходить з центрального отвору 5, тому при виході з пазів 6 обертальний по гвинтовій лінії водяний потік 9 не надає обертального впливу на водяний потік 10, що поступово рухається, внаслідок чого два водяні потоки 9 і 10 рухаються більшою або меншою мірою ізольовано. Ізольований рух двох потоків триває також і після торця 11 вкладиша 3 у зв'язку з тим, що за торцем 11 виникає "слід" - межа розділу 12 двох потоків. В результаті цього водяний потік, що обертається, 9 не сприяє обертанню водного потоку 10 і вода з потоку 10 не переміщається на периферію. При подальшому русі на виході з форсунки виникає водяний факел, що складається з двох практично ізольованих частин 13 і 14. Центральна частина 13 потоку вздовж поздовжньої осі 7 містить велику кількість води, а периферійна частина 14 потоку містить меншу кількість води, тобто. тільки воду, яка вийшла з вихроутворних зовнішніх пазів 6.

При роботі вихрової форсунки 15 у водоповітряному сопі 16, що представляє собою трубу, в яку за допомогою вентилятора 17 подається повітря, створюваної водяний факел надає менший опір руху повітря, так як центральна частина 13

факела, що містить велику кількість води, має напрямок, що збігається з напрямком повітря, а периферійна частина факела, що рухається під кутом до напрямку повітря, має зменшену кількість води через перерозподіл щільності водяного

Вихрова форсунка для пилоподавлення дозволяє підвищити продуктивність створюваного водоповітряного струменя, збільшити швидкість водоповітряного струменя на виході з сопла, що забезпечує підвищення ефективності пилоподавлення і провітрювання захисту простору, в якому знаходиться буровий виконавчий орган прохідницького комбайна.

Використання винаходу дозволить покращити умови праці в прохідницьких вибоях із комбайнами бурового типу.

Винахід відноситься [6] до гірничої промисловості і може бути використане для зниження пилу в вибоях очисних та підготовчих виробок

Мета винаходу - підвищення ефективності роботи форсунки за рахунок збільшення кута розкриття зрошувального факела.

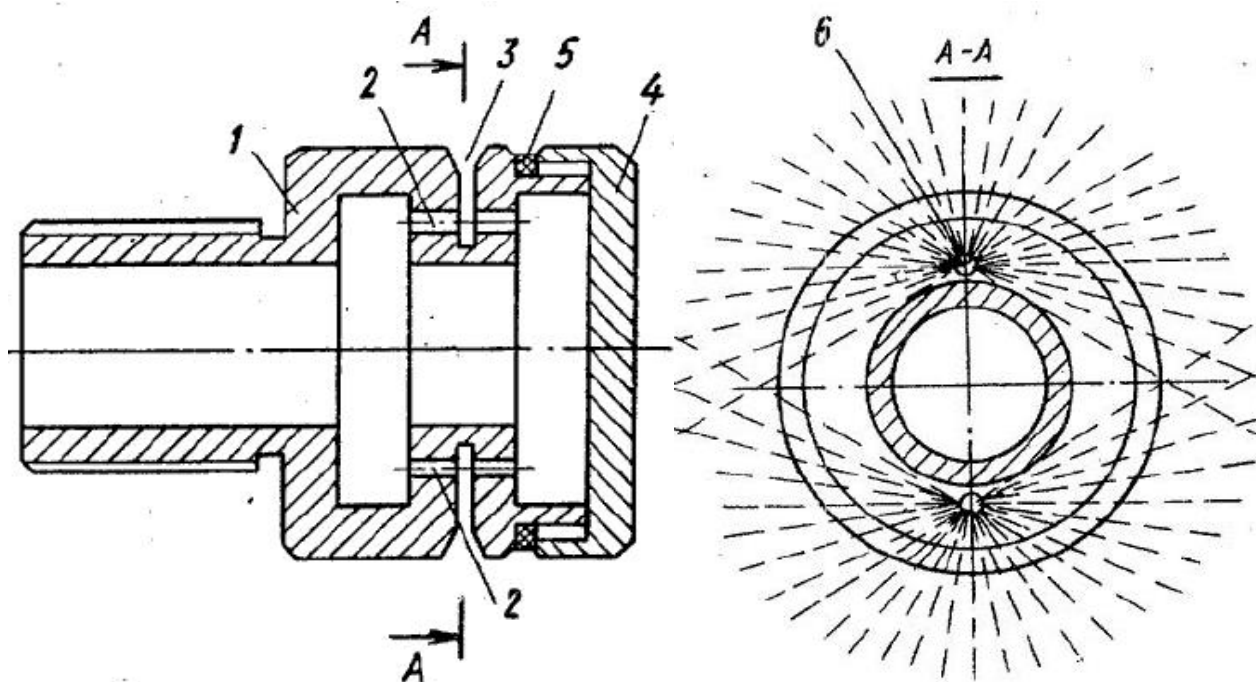


Рис 2.6 – До патенту [6]

Форсунка складається з корпусу 1, всередині якого паралельно поздовжньої осі форсунки розташовуються канали 2 формування факела рідини. пазом 3



утворюються отвори 6 рівномірно розосереджені по довжині паза 3 через однакові кутові проміжки.

Форсунка працює в такий спосіб.

Вода під тиском надходить у канали формування 2 факела рідини. У місці перетину каналів 2 і паза 3 відбувається зіткнення зустрічних струменів води, що витікають з циліндричних отворів 6. Зіткнення струменів відбувається по зустрічних напрямках, утворюючи плоский факел з кутом розкриття 360.

### 2.3. Методика дослідження форми сопла прямої форсунки туманоутворювача

Визначальним параметром, який визначає ефективність розсіювання води та краплеутворення є перепад тиску у камері форсунки та зовнішнього середовища, що спричиняє кавітаційний розрив суцільного струменя води.

Отже визначальними параметрами є перепад площин вхідного перетину та вихідного отворів

$$Q_{вх} = \frac{v_{вх} \cdot \pi \cdot D_{вх}^2}{4}; \quad Q_{вих} = \frac{v_{вих} \cdot \pi \cdot D_{вих}^2}{4} \quad (2.1)$$

Вважаючи, що  $Q_{вх} = Q_{вих}$

$$Q_{вх} = Q_{вих} \Rightarrow \frac{v_{вх} \cdot \pi \cdot D_{вх}^2}{4} = \frac{v_{вих} \cdot \pi \cdot D_{вих}^2}{4} \Rightarrow v_{вх} \cdot D_{вх}^2 = v_{вих} \cdot D_{вих}^2 \Rightarrow \frac{D_{вх}^2}{D_{вих}^2} = \frac{v_{вих}}{v_{вх}} \quad (2.2)$$

Таким чином, у подальшому дослідженні потрібно визначити раціональне співвідношення вхідної та вихідної швидкостей, або вхідного або вихідного діаметру.

Основною умовою появи кавітації є різке падіння тиску рідини. Кавітація найчастіше виникає при досягненні тиску нижче рівня, необхідного для випаровування води за даної температури (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Залежність тиску випаровування води від температури:

Температура (°C)	Тиск (Па)
10	1228

20	2339
30	4246
40	7384
50	12352
60	19933
70	31824
80	47337
90	70139
100	101325

Наведені табличні значення можна описати залежністю

$$P(T) = 1258 - 911.47 \cdot T + 17.5 \cdot T^2 \quad (2.3)$$

Кавітація може виникнути, якщо швидкість потоку рідини через звужені ділянки збільшується настільки, що тиск знижується. Це часто спостерігається у гідравлічних системах, насосах та пропелерах.

Найкращим варіантом може бути використання сопла Лавалю для генерації зниження тиску та виникнення кавітації.

Метою дослідження є визначення таких геометричних параметрів сопла форсунки, які б забезпечили утворення кавітації при заданому початковому діаметрі трубопроводу та витраті.

Варійовані чинники:

- витрата води  $Q_e$ , м<sup>3</sup>/с; область дослідження: 0,0001 – 0,0005 - 0,001;
- початковий діаметр  $D_e$ , м; область дослідження: 0,010 – 0,025 - 0,040;
- співвідношення початкового діаметру до діаметру критичного перетину  $D_e / D_{кр}$ ; область дослідження: 6 – 8 – 10.

Функції відгуку

- мінімальний тиск у соплі  $P_{min}$ , атм;
- тиск на вході  $P_e$ , атм;
- максимальна швидкість потоку на виході  $v_{max}$ , м/с.

Сталі чинники:

- речовина, що витікає – вода;
- температура води -20 °С.

Створимо матрицю експерименту (табл 2.1).

Таблиця 2.1 – Матриця експерименту

№	X1 - витрата води $Q_e$ , м <sup>3</sup> /с	X2 - початковий діаметр $D_e$ , м	X3 - співвідношення діаметрів $D_e$ $/D_{кр}$ ;	Діаметр критичного перетину $D_{кр}$ , м	Y1 – $P_{min}$ , атм	Y2 – $P_e$ , атм	Y4 – $v_{max}$ , м/с
1	0,0001	0,010	6	0,0017			
2	0,0001	0,010	8	0,00125			
3	0,0001	0,010	10	0,001			
4	0,0001	0,025	6	0,0042			
5	0,0001	0,025	8	0,003125			
6	0,0001	0,025	10	0,0025			
7	0,0001	0,040	6	0,007			
8	0,0001	0,040	8	0,005			
9	0,0001	0,040	10	0,004			
10	0,0005	0,010	6	0,0017			
11	0,0005	0,010	8	0,00125			
12	0,0005	0,010	10	0,001			
13	0,0005	0,025	6	0,0042			
14	0,0005	0,025	8	0,003125			
15	0,0005	0,025	10	0,0025			
16	0,0005	0,040	6	0,007			
17	0,0005	0,040	8	0,005			
18	0,0005	0,040	10	0,004			
19	0,001	0,010	6	0,0017			
20	0,001	0,010	8	0,00125			
21	0,001	0,010	10	0,001			
22	0,001	0,025	6	0,0042			
23	0,001	0,025	8	0,003125			
24	0,001	0,025	10	0,0025			
25	0,001	0,040	6	0,007			
26	0,001	0,040	8	0,005			
27	0,001	0,040	10	0,004			

Дослідження планується проводити за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням САПР SolidWorks з модулем Flow Simulation.

Комп'ютерна модель наведена на рис 2.7.

Згідно з розробленим планом експерименту визначається вплив варійованих чинників на 3 функції відгуку.

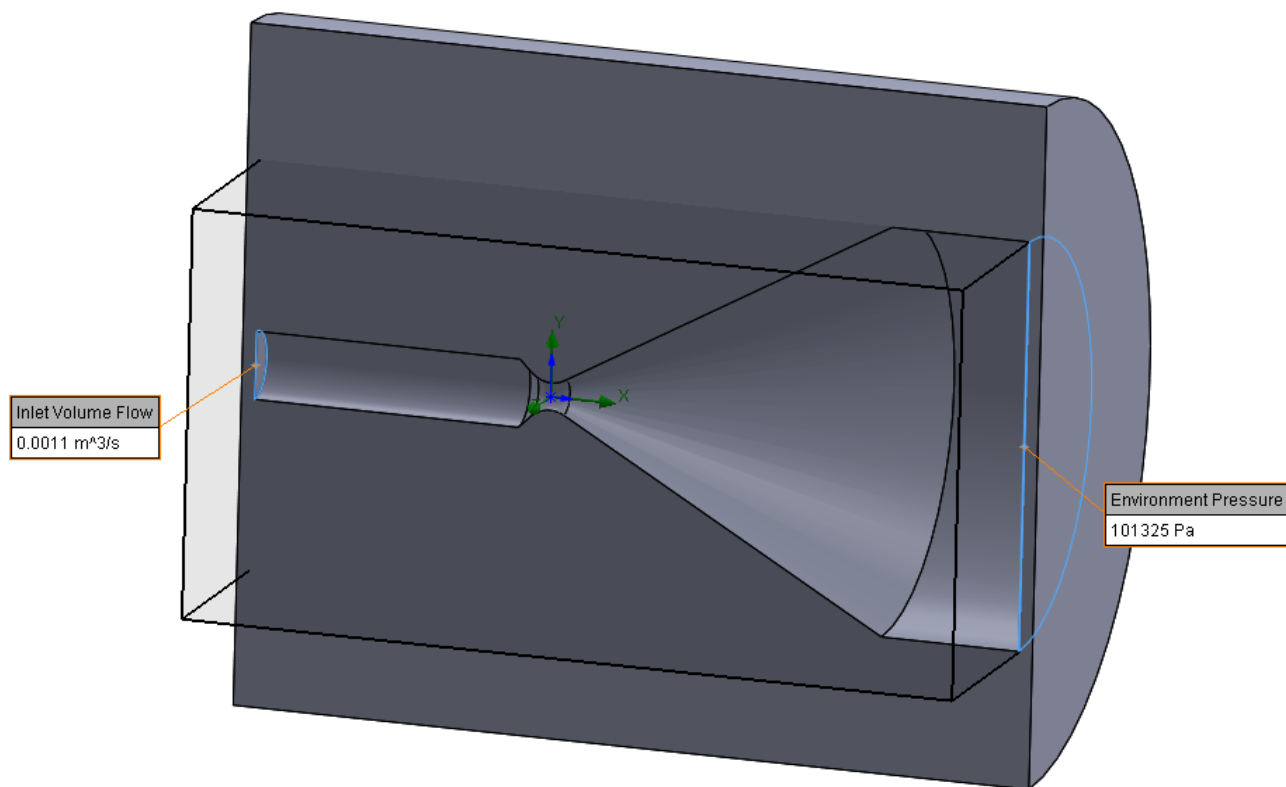
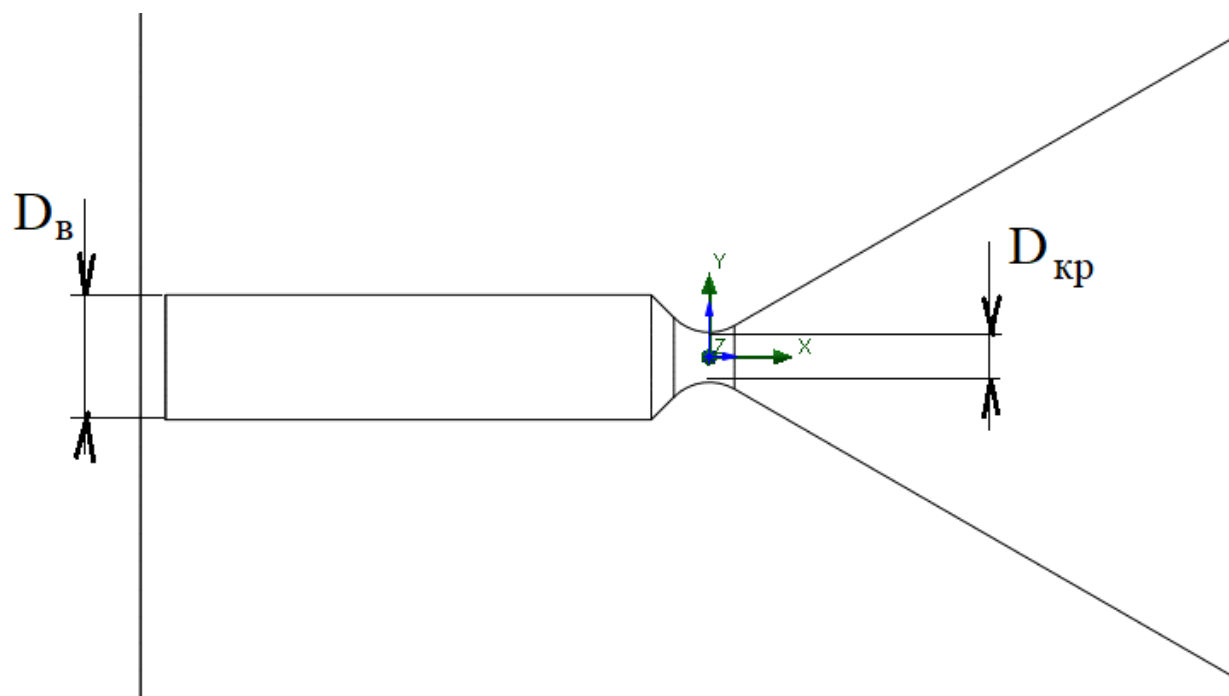


Рис 2.7 – Розрахункова модель

## 2.4. Методика порівняльного дослідження конструкцій прямоїчних форсунок туманоутворювача

На основі розроблених залежностей для визначення раціональних параметрів форсунок, що сприяють появі кавітації, як додаткового ефекту для отримання тонкодисперсного водяного пилу, проведемо порівняльні дослідження відомих форсунок туманоутворення з раціональними соплами. Метою дослідження є визначення конструкції форсунки, яка дає максимальний конус розприскування води.

Розглянемо наступні конструкції форсунок (рис 2.8, 2.9).

У конструкціях аналізованих форсунок закладаємо профіль сопла Лавалю на основі отриманих залежностей. Головним є саме співвідношення початкового діаметру до діаметру критичного перетину  $D_v / D_{кр}$

На основі аналізу поля розпилення розглянутих форсунок пропонується нова конструкція сопла, яке сприятиме максимізації площі розпилення води.

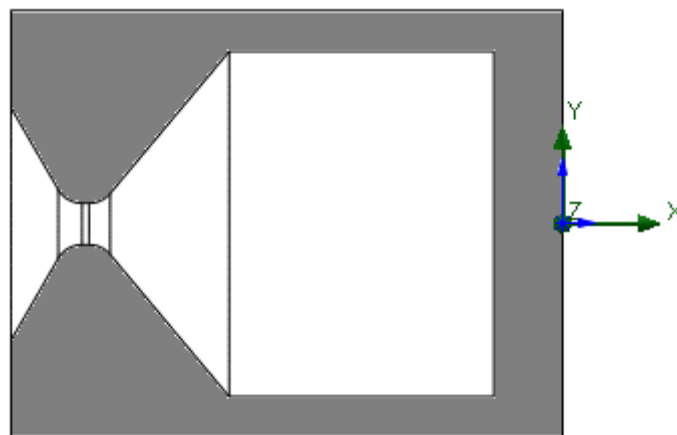


Рис 2.8 – Звичайна форсунка

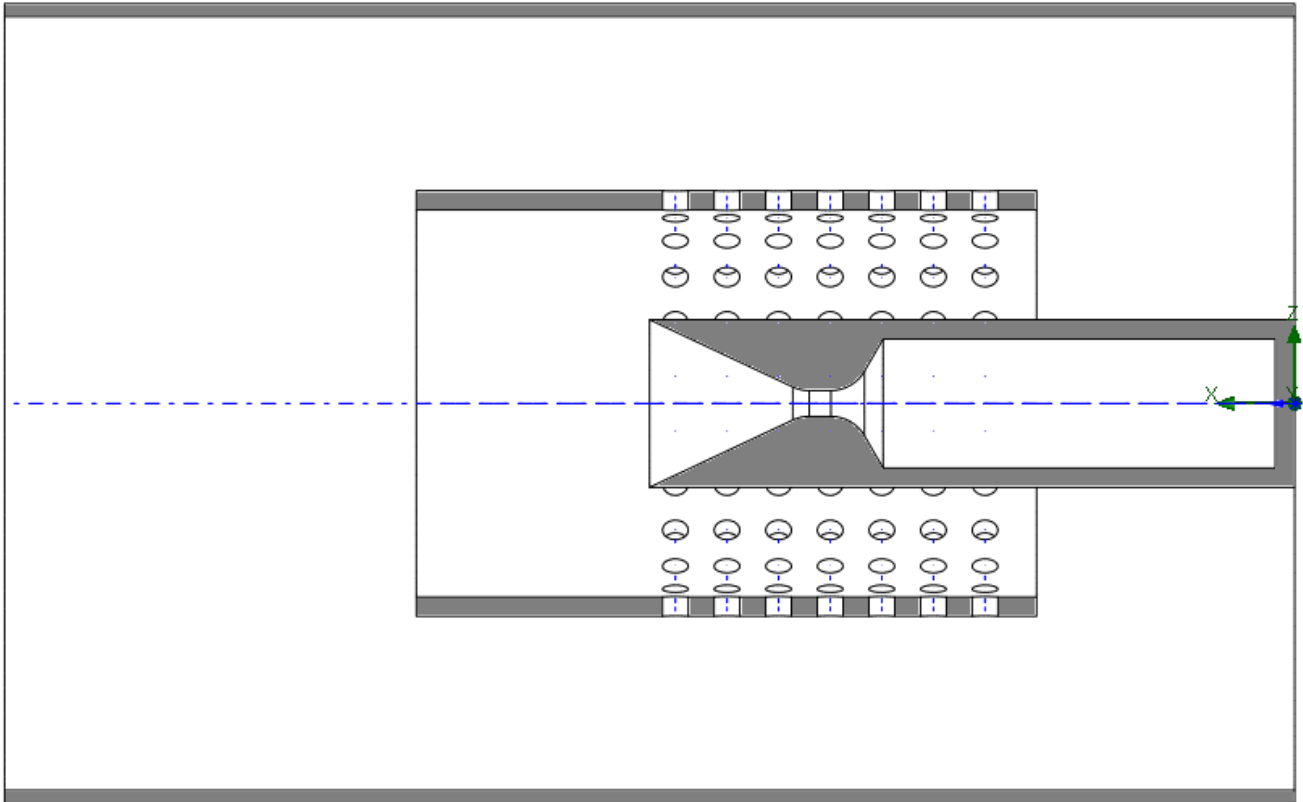


Рис 2.9 – Форсунка згідно патенту []

## Висновки до розділу 2

1. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи та покращити режим роботи форсунок пилоподавлення за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
2. Проведено аналіз шляхів підвищення ефективності роботи форсунок пилоподавлення.
3. Встановлено, що одним зі шляхів підвищення ефективності роботи форсунок пилоподавлення є додаткове використання ефекту кавітації, яка може збільшити ефективність розсіювання води та краплеутворення через кавітаційний розрив та випаровування суцільного струменя води. Кавітація найчастіше виникає при досягненні тиску нижче рівня, необхідного для випаровування води за даної температури.

4. Встановлено, що визначальними параметрами є перепад площин вхідного перетину та вихідного отворів, оскільки кавітація може виникнути, якщо швидкість потоку рідини через звужені ділянки збільшується настільки, що тиск знижується. Таким чином, у подальшому дослідженні потрібно визначити раціональне співвідношення вхідної та вихідної швидкостей, або вхідного або вихідного діаметру.
5. Встановлено, що найкращим варіантом може бути використання сопла Лавалю для генерації зниження тиску та виникнення кавітації.
6. Розроблено методику дослідження форми вихідного отвору форсунки у формі сопла Лавалю, у якому визначаються геометричні параметри сопла форсунки, які б забезпечили утворення кавітації при заданому початковому діаметрі трубопроводу та витраті.
7. Розроблено методику порівняльного дослідження різних конструкцій форсунок пилоподавлення на основі розроблених залежностей для визначення раціональних параметрів форсунок, що сприяють появі кавітації, як додаткового ефекту для отримання тонкодисперсного водяного пилу з метою визначення конструкції форсунки, яка дає максимальний конус розприскування води.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРСУНОК ПИЛОПОДАВЛЕННЯ

#### 3.1. Дослідження форми сопла прямої форсунки зрошувача

Результати спланованого дослідження наведені у табл 3.1. Додатково наведено значення об'ємної частки пари, що дає змогу оцінити проходження кавітаційних процесів.

Таблиця 3.1 – Результати експерименту

№	X1 - витрата води $Q_e$ , м <sup>3</sup> /с	X2 - початковий діаметр $D_e$ , м	X3 - співвідношення діаметрів $D_e / D_{кр}$	Діаметр критичного перетину $D_{кр}$ , м	Y1 – $P_{min}$ , атм	Y2 – $P_e$ , атм	Y4 – $v_{max}$ , м/с	Об'ємної частки пари
1	0,0001	0,010	6	0,0017	0.044	25.207	69.219	0,3127
2	0,0001	0,010	8	0,00125	0.025	115.334	124.611	0,95
3	0,0001	0,010	10	0,001	0.026	222.19	205.84	0,94
4	0,0001	0,025	6	0,0042	0.685	1.814	11.353	0
5	0,0001	0,025	8	0,003125	0.1	2.572	20.036	0,0012
6	0,0001	0,025	10	0,0025	0.057	8.112	31.589	0,1735
7	0,0001	0,040	6	0,007	0.981	1.03	2.952	0
8	0,0001	0,040	8	0,005	0.888	1.348	6.948	0
9	0,0001	0,040	10	0,004	0.64	1.99	11.828	0
10	0,0005	0,010	6	0,0017	0.017	665.311	351.516	0,875
11	0,0005	0,010	8	0,00125	0.01	2971	624.302	0,95
12	0,0005	0,010	10	0,001	0.01	5365	1061	0,95
13	0,0005	0,025	6	0,0042	0.051	23.506	55.669	0,255
14	0,0005	0,025	8	0,003125	0.023	58.554	101.916	0,95
15	0,0005	0,025	10	0,0025	0.027	204.163	158.421	0,95
16	0,0005	0,040	6	0,007	0.399	1.728	14.976	0
17	0,0005	0,040	8	0,005	0.082	9.921	35.074	0,053
18	0,0005	0,040	10	0,004	0.054	28.83	59.367	0,227
19	0,001	0,010	6	0,0017	0.011	2574	693.495	0,95
20	0,001	0,010	8	0,00125	0.01	12080	1240	0,95
21	0,001	0,010	10	0,001	0.01	23770	2002	0,95
22	0,001	0,025	6	0,0042	0.026	93.417	107.811	0,914
23	0,001	0,025	8	0,003125	0.026	238.698	204.216	0,95
24	0,001	0,025	10	0,0025	0.023	825.595	314.978	0,95
25	0,001	0,040	6	0,007	0.074	5.146	30.144	0,083
26	0,001	0,040	8	0,005	0.023	39.495	70.205	0,91
27	0,001	0,040	10	0,004	0.027	116.682	119.628	0,867

Задля обробки результатів дослідження використаємо ПКА MathCAD. Для зручності обробка отриманих даних переведемо отримані таблиці у матричну форму.



Значення факторів

	X1	X2	X3
XXX :=	0.0001	0.010	6
	0.0001	0.010	8
	0.0001	0.010	10
	0.0001	0.025	6
	0.0001	0.025	8
	0.0001	0.025	10
	0.0001	0.040	6
	0.0001	0.040	8
	0.0001	0.040	10
	0.0005	0.010	6
	0.0005	0.010	8
	0.0005	0.010	10
	0.0005	0.025	6
	0.0005	0.025	8
	0.0005	0.025	10
	0.0005	0.040	6
	0.0005	0.040	8
	0.0005	0.040	10
	0.001	0.010	6
	0.001	0.010	8
	0.001	0.010	10
	0.001	0.025	6
	0.001	0.025	8
	0.001	0.025	10
	0.001	0.040	6
	0.001	0.040	8
	0.001	0.040	10

Значення функцій відгуку

	Y1	Y2	Y3	
YYY =	0	0.044	25.207	69.219
	1	0.025	115.334	124.611
	2	0.026	222.19	205.84
	3	0.685	1.814	11.353
	4	0.1	2.572	20.036
	5	0.057	8.112	31.589
	6	0.981	1.03	2.952
	7	0.888	1.348	6.948
	8	0.64	1.99	11.828
	9	0.017	665.311	351.516
	10	0.01	$2.971 \cdot 10^3$	624.302
	11	0.01	$5.365 \cdot 10^3$	$1.061 \cdot 10^3$
	12	0.051	23.506	55.669
	13	0.023	58.554	101.916
	14	0.027	204.163	158.421
	15	0.399	1.728	14.976
	16	0.082	9.921	35.074
	17	0.054	28.83	59.367
	18	0.011	$2.574 \cdot 10^3$	693.495
	19	0.01	$1.208 \cdot 10^4$	$1.24 \cdot 10^3$
	20	0.01	$2.377 \cdot 10^4$	$2.002 \cdot 10^3$
	21	0.026	93.417	107.811
	22	0.026	238.698	204.216
	23	0.023	825.595	314.978
	24	0.074	5.146	30.144
	25	0.023	39.495	70.205
	26	0.027	116.682	119.628

Мінімальний тиск у соплі  $P_{min}$ , атм

$$A1 := \text{regress}(XXX, YYY^{(0)}, 2)$$

$$F1(x1, x2, x3) := \text{interp}\left[A1, XXX, YYY^{(0)}, \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{pmatrix}\right]$$

Коефіцієнт кореляції

$$\text{corr}\left(YYY^{(0)}, \overrightarrow{F1(XXX^{(0)}, XXX^{(1)}, XXX^{(2)})}\right) = 0.937$$

$$\varepsilon_1 := \frac{\sum_{i=0}^{26} \frac{|Y_{i,0} - F_1(X_{i,0}, X_{i,1}, X_{i,2})|}{Y_{i,0}}}{27} \cdot 100 = 16.97$$

Похибка апроксимації

$$F(x_1, x_2, x_3) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^3 + a_{12}x_1x_2 + a_{23}x_2x_3 + a_{13}x_1x_3$$

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти кореляції

Коефіцієнти кореляції	Значення
$a_0$	0,959
$a_1$	-1204
$a_2$	25,63
$a_3$	-0,211
$a_{11}$	746300
$a_{22}$	321
$a_{33}$	0,011
$a_{12}$	-27870
$a_{23}$	-1,961
$a_{13}$	85,3

Визначення впливу факторів на функцію відгуку

$$X_{1n} := 0.0005$$

$$X_{2n} := 0.015$$

$$X_{3n} := 3$$

$$X_{1p} := X_{1n} \cdot 1.05 = 5.25 \times 10^{-4}$$

$$X_{2p} := X_{2n} \cdot 1.05 = 0.016$$

$$X_{3p} := X_{3n} \cdot 1.05 = 3.15$$

$$Y_{1n} := F_1(X_{1n}, X_{2n}, X_{3n}) = 0.296$$

$$Y_{11} := F_1(X_{1p}, X_{2n}, X_{3n}) = 0.281$$

$$Y_{12} := F_1(X_{1n}, X_{2p}, X_{3n}) = 0.308$$

$$Y_{13} := F_1(X_{1n}, X_{2n}, X_{3p}) = 0.276$$

$$k_{11} := \frac{|Y_{11} - Y_{1n}|}{X_{1p} - X_{1n}} \cdot \frac{X_{1n}}{Y_{1n}} = 1.016 \quad k_{12} := \frac{|Y_{12} - Y_{1n}|}{X_{2p} - X_{2n}} \cdot \frac{X_{2n}}{Y_{1n}} = 0.795 \quad k_{13} := \frac{|Y_{13} - Y_{1n}|}{X_{3p} - X_{3n}} \cdot \frac{X_{3n}}{Y_{1n}} = 1.324$$

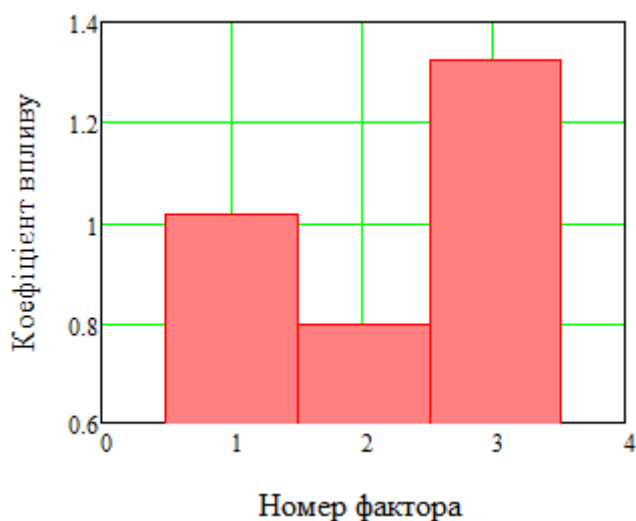


Рис 3.1 – Вплив факторів на функцію відгуку

Згідно графіку наведеному на рис 3.1, усі фактори мають достатній вплив на функцію відгуку. Найбільший вплив на мінімальний тиск у соплі має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – вхідна витрата води, а мінімальний вплив має значення діаметру вхідного патрубку.

Загальний вид залежності наведений на рис 3.2.

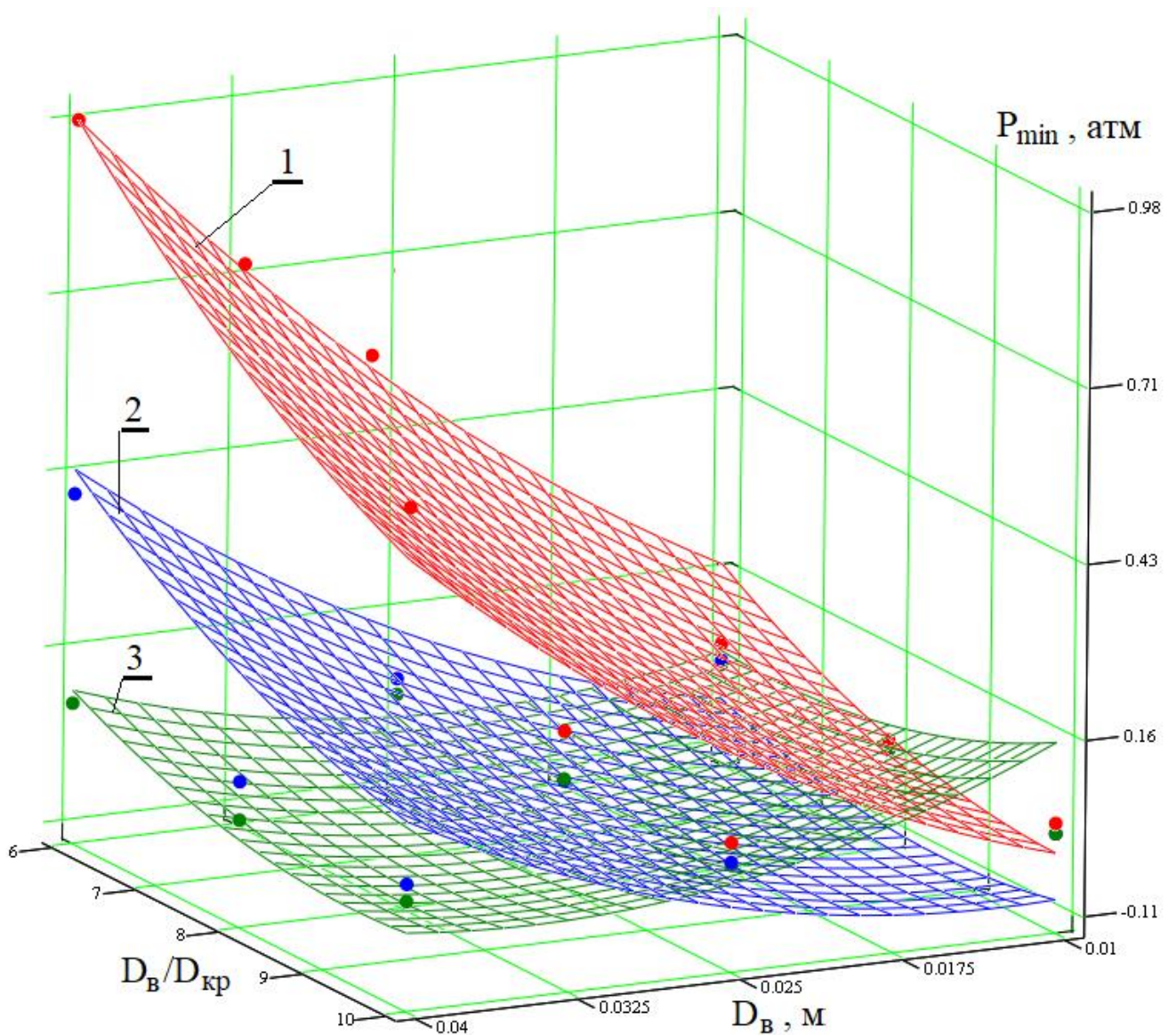


Рис 3.2 – Залежність мінімального тиску у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів: 1 –  $Q_B = 0.0001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 -  $Q_B = 0.0005 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 -  $Q_B = 0.001 \text{ м}^3/\text{с}$

Тиск на вході  $P_{в}$ , атм;

$$A2 := \text{regress}(XXX, YYY^{(1)}, 2)$$

$$F2(x21, x22, x23) := \text{interp}\left[A2, XXX, YYY^{(1)}, \begin{pmatrix} x21 \\ x22 \\ x23 \end{pmatrix}\right]$$

Коефіцієнт кореляції

$$\text{corr}(YYY^{(1)}, F2(XXX^{(0)}, XXX^{(1)}, XXX^{(2)})) = 0.91$$

Похибка апроксимації

$$\epsilon_2 := \frac{\sum_{i=0}^{26} \frac{|YYY_{i,1} - F2(XXX_{i,0}, XXX_{i,1}, XXX_{i,2})|}{YYY_{i,1}}}{27} \cdot 100 = 17.51$$

$$F(x_1, x_2, x_3) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{23}x_2x_3 + a_{13}x_1x_3$$

Таблиця 3.3 – Коефіцієнти кореляції

Коефіцієнти кореляції	Значення
$a_0$	$-1,163 \cdot 10^4$
$a_1$	$1,53 \cdot 10^6$
$a_2$	$-4,332 \cdot 10^4$
$a_3$	$2,726 \cdot 10^3$
$a_{11}$	$2,067 \cdot 10^9$
$a_{22}$	$8,45 \cdot 10^6$
$a_{33}$	$-110,503$
$a_{12}$	$-3,37 \cdot 10^8$
$a_{23}$	$-4,193 \cdot 10^4$
$a_{13}$	$1,018 \cdot 10^6$

Визначення впливу факторів на функцію відгуку

$$\begin{aligned} X1n &:= 0.0005 & X2n &:= 0.015 & X3n &:= 8 \\ X1p &:= X1n \cdot 1.05 = 5.25 \times 10^{-4} & X2p &:= X2n \cdot 1.05 = 0.016 & X3p &:= X3n \cdot 1.05 = 8.4 \end{aligned}$$

$$Y2n := F2(X1n, X2n, X3n) = 2.156 \times 10^3$$

$$Y21 := F2(X1p, X2n, X3n) = 2.325 \times 10^3 \quad k21 := \frac{|Y21 - Y2n|}{|X1p - X1n|} \cdot \frac{X1n}{Y2n} = 1.561$$

$$Y22 := F2(X1n, X2p, X3n) = 1.941 \times 10^3 \quad k22 := \frac{|Y22 - Y2n|}{|X2p - X2n|} \cdot \frac{X2n}{Y2n} = 1.999$$

$$Y23 := F2(X1n, X2n, X3p) = 2.474 \times 10^3 \quad k23 := \frac{|Y23 - Y2n|}{|X3p - X3n|} \cdot \frac{X3n}{Y2n} = 2.945$$

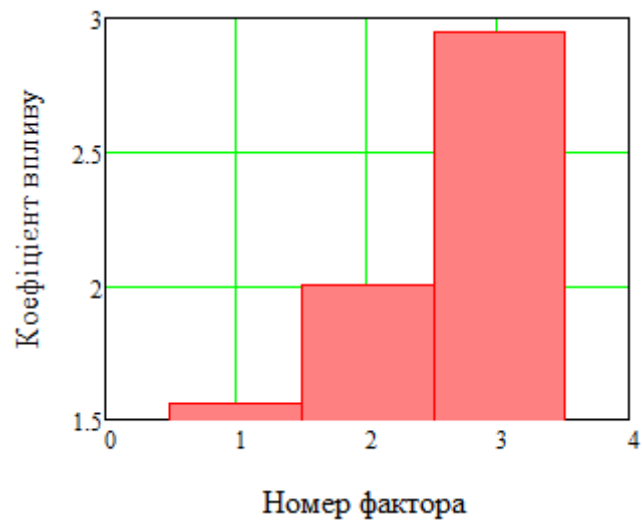


Рис 3.3 – Вплив факторів на функцію відгуку

Згідно графіку наведеному на рис 3.3, усі фактори мають вплив на функцію відгуку. Найбільший вплив на тиск у вхідному патрубку має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубка, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.

Загальний вид залежності наведений на рис 3.4.



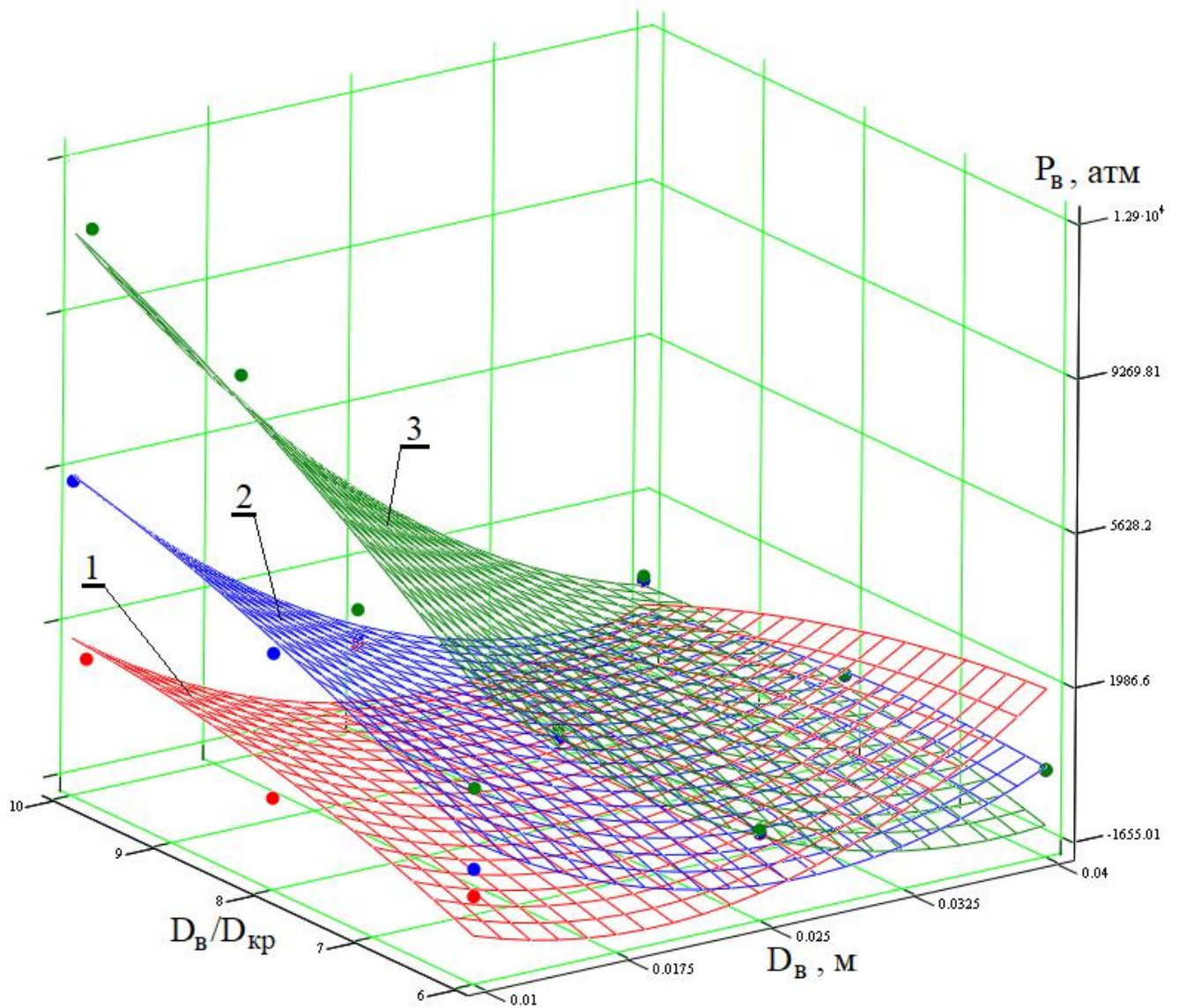


Рис 3.4 – Залежність тиску на вході у сопло від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів: 1 –  $Q_B = 0.0001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 –  $Q_B = 0.0005 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 –  $Q_B = 0.001 \text{ м}^3/\text{с}$

Максимальна швидкість потоку на виході  $v_{\text{max}}$ , м/с

$$A3 := \text{regress}(XXX, YYY^{(2)}, 2)$$

$$F3(x1, x2, x3) := \text{interp}\left[A3, XXX, YYY^{(2)}, \begin{pmatrix} x1 \\ x2 \\ x3 \end{pmatrix}\right]$$

Коефіцієнт кореляції

$$\text{corr}\left(YYY^{(2)}, \overrightarrow{F3(XXX^{(0)}, XXX^{(1)}, XXX^{(2)})}\right) = 0.96$$

Похибка апроксимації

$$\epsilon_3 := \frac{\sum_{i=0}^{26} \frac{|YYY_{i,2} - F3(XXX_{i,0}, XXX_{i,1}, XXX_{i,2})|}{YYY_{i,2}}}{27} \cdot 100 = 9.71$$

$$F(x_1, x_2, x_3) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^3 + a_{12}x_1x_2 + a_{23}x_2x_3 + a_{13}x_1x_3$$

3	1.329·10 <sup>5</sup>	0 - a13
4	-5.59·10 <sup>3</sup>	1 - a23
5	6.222	2 - a33
6	42.3	3 - a3
7	-4.114·10 <sup>7</sup>	4 - a12
8	1.163·10 <sup>6</sup>	5 - a22
9	-1.381·10 <sup>4</sup>	6 - a2
10	-194.679	7 - a0
11	5.374·10 <sup>5</sup>	8 - a1
12	-3.787·10 <sup>7</sup>	9 - a11

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти кореляції

Коефіцієнти кореляції	Значення
a <sub>0</sub>	
a <sub>1</sub>	
a <sub>2</sub>	
a <sub>3</sub>	
a <sub>11</sub>	
a <sub>22</sub>	
a <sub>33</sub>	
a <sub>12</sub>	
a <sub>23</sub>	
a <sub>13</sub>	

Визначення впливу факторів на функцію відгуку

$$\begin{aligned} X1n &:= 0.0005 & X2n &:= 0.015 & X3n &:= 8 \\ X1p &:= X1n \cdot 1.05 = 5.25 \times 10^{-4} & X2p &:= X2n \cdot 1.05 = 0.016 & X3p &:= X3n \cdot 1.05 = 8.4 \\ Y3n &:= F3(X1n, X2n, X3n) = 416.465 \\ Y31 &:= F3(X1p, X2n, X3n) = 437.18 & k31 &:= \frac{|Y31 - Y3n|}{|X1p - X1n|} \cdot \frac{X1n}{Y3n} = 0.995 \\ Y32 &:= F3(X1n, X2p, X3n) = 386.985 & k32 &:= \frac{|Y32 - Y3n|}{|X2p - X2n|} \cdot \frac{X2n}{Y3n} = 1.416 \\ Y33 &:= F3(X1n, X2n, X3p) = 455.661 & k33 &:= \frac{|Y33 - Y3n|}{|X3p - X3n|} \cdot \frac{X3n}{Y3n} = 1.882 \end{aligned}$$

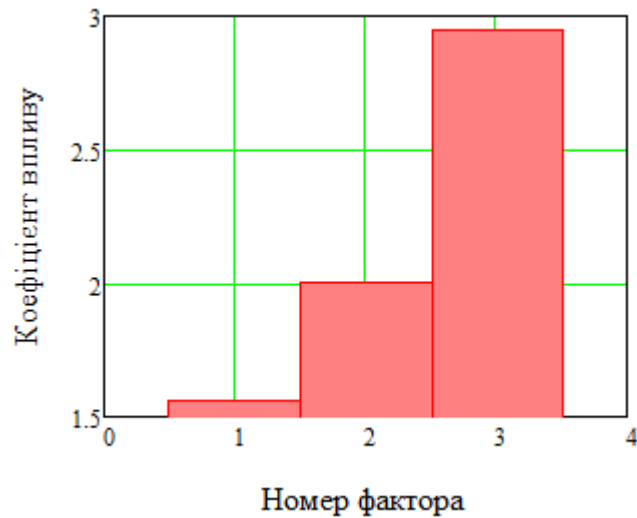


Рис 3.5 – Вплив факторів на функцію відгуку

Згідно графіку наведеному на рис 3.5, усі фактори мають вплив на функцію відгуку. Найбільший вплив на максимальну швидкість води має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубка, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.

Загальний вид залежності наведений на рис 3.6.



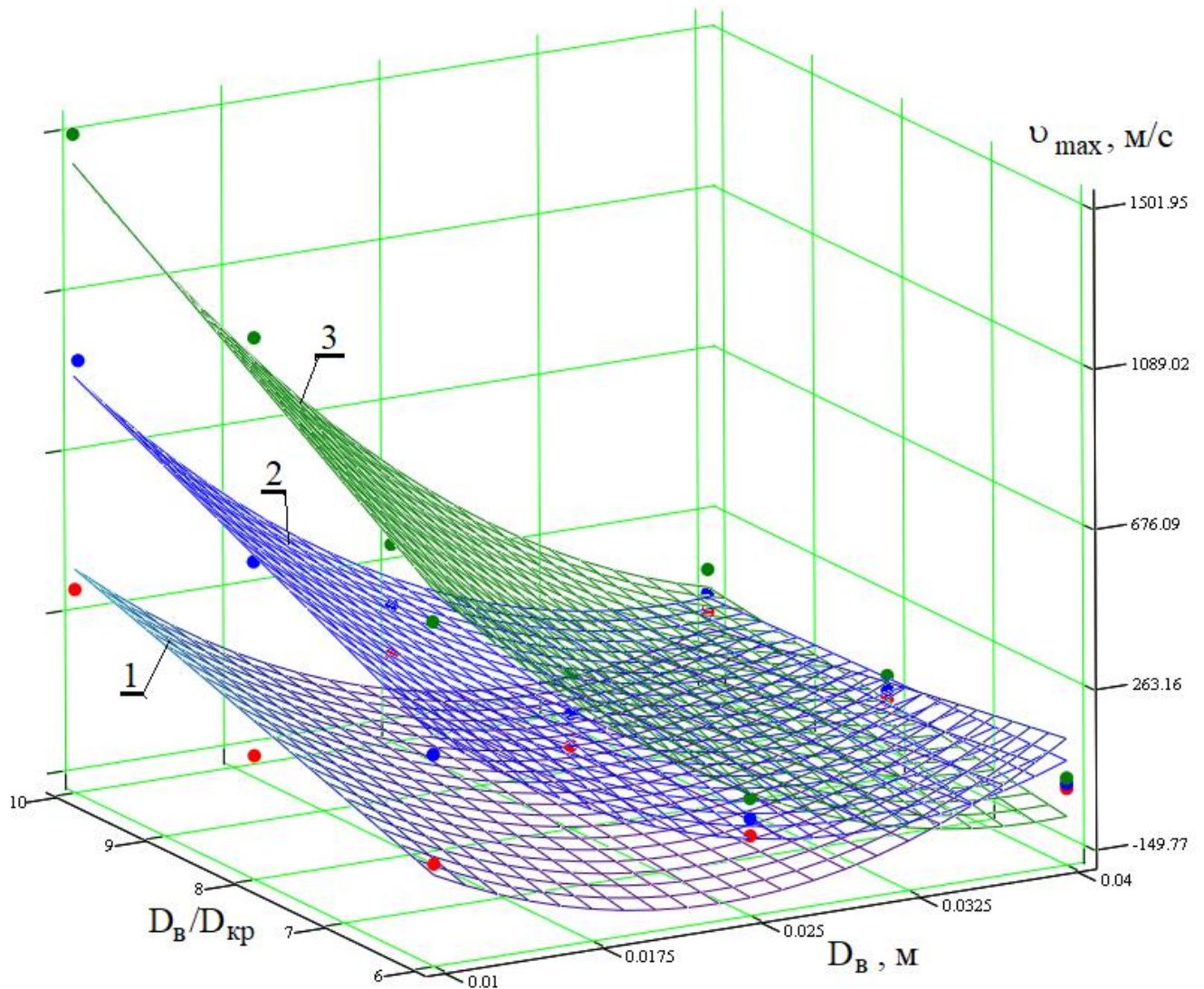


Рис 3.6 – Залежність максимальної швидкості води у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів: 1 –  $Q_B = 0.0001 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 2 -  $Q_B = 0.0005 \text{ м}^3/\text{с}$ ; 3 -  $Q_B = 0.001 \text{ м}^3/\text{с}$

**Якісний аналіз.** Найголовнішим питанням є кавітаційні процеси при розпиленні води. З табл. 3.1 видно, що за швидкості руху води нижчою за 14 м/с та мінімального тиску більшому за 0,3 атм кавітація не настає за жодних інших умов. Також видно, що перші ознаки кавітації починають проявлятися починаючи зі швидкості руху води біля 20-30 м/с та за мінімального тиску 0,1 атм, при швидкості біля 50 м/с і мінімальному тиску 0,05 атм кавітаційні процеси посилюються, а при швидкості більше 100 м/с і мінімальному тиску 0,01 атм спостерігається максимальний вплив кавітації.

### 3.2. Порівняльне дослідження конструкцій прямоїчних форсунок туманоутворювача

Розглянемо конструкцію звичайної форсунки. Діаметр вхідного патрубку 25 мм. Нехай планується підключення форсунки до гідравлічної мережі з витратою 7 м<sup>3</sup>/год.

Потрібно забезпечити мінімальну швидкість руху води біля 20-30 м/с та мінімальний тиск 0,1 атм, та раціональну швидкість біля 50 м/с і мінімальний тиск 0,05 атм.

Згідно отриманим залежностей

$$P_{\min}(Q_g, D_g, k) = 0,96 - 1204Q_g + 25,63D_g - 0,211k + 74300Q_g^2 + 321D_g^2 + 0,011k^2 - 27870Q_gD_g - 1,96D_gk + 85,3Q_gk$$

Звідси співвідношення вхідного та критичного діаметрів:

$$k = 9,6 + 89,14D_g - 3877,27Q_g + 45,45\sqrt{891,73Q_gD_g - 10,28D_g^2 - 0,3D_g - 25561Q_g^2 + 16,98Q_g + 0,044P_{\min} + 0,0023}$$

Для схеми 1 (рис 3.7), якщо  $Q_b = 0,0019$  м<sup>3</sup>/с,  $D_b = 0,025$  мм;  $P_{\min} = 0,05$  атм, то  $k = 6,9$ .

Для схеми 2 (рис 3.8), якщо  $Q_b = 0,001$  м<sup>3</sup>/с,  $D_b = 0,01$  мм;  $P_{\min} = 0,05$  атм, то  $k = 7,8$ .

Таким чином, встановлюємо граничні умови для обох схем (рис 3.7, 3.8).

Результат розрахунку схеми 1 наведені на рис 3.9, 3.10, 3.11.

У першій схемі 1 струмінь розповсюджується майже прямолінійно, кут розкриття конуса потоку дуже малий. Завдяки розрахованому діаметру критичного перетину швидкість струменя досить висока.

Результат розрахунку схеми 2 наведені на рис 3.12, 3.13, 3.14.

У першій схемі 2 струмінь розповсюджується також майже прямолінійно, кут розкриття конуса потоку більший завдяки підсмоктуванню повітря ззаду труби. Завдяки розрахованому діаметру критичного перетину швидкість струменя достатньо висока.

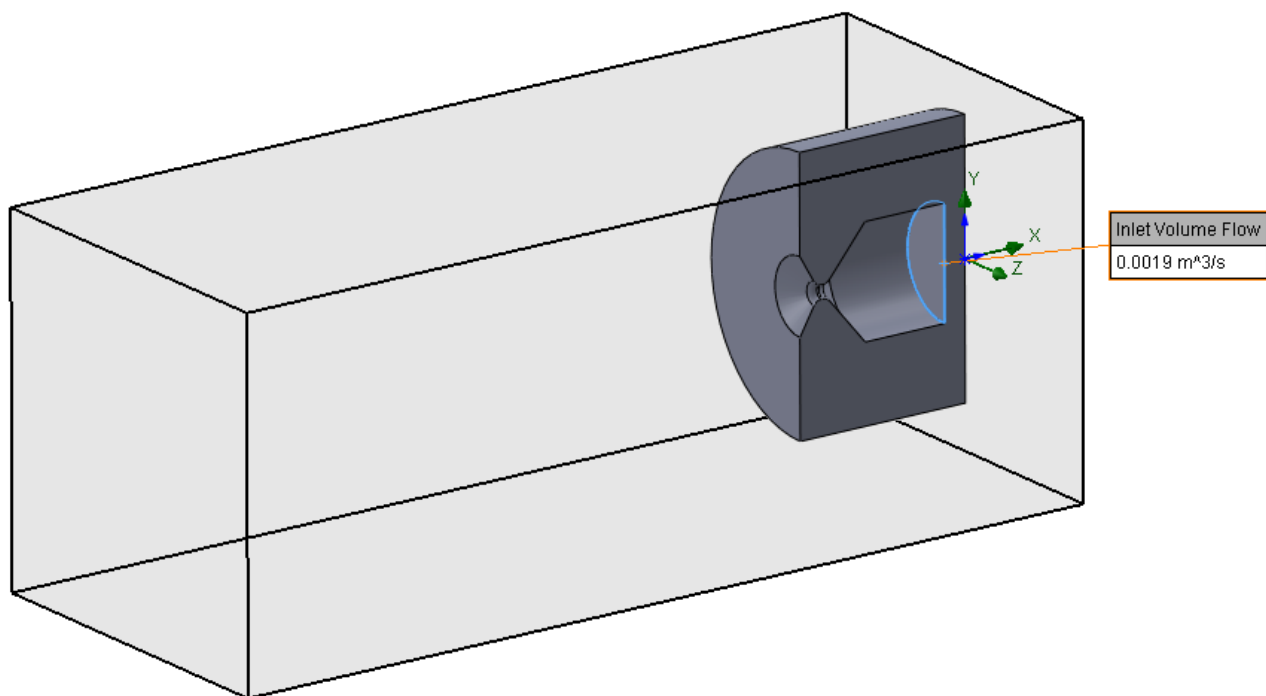


Рис 3.7 – Розрахункова модель 1

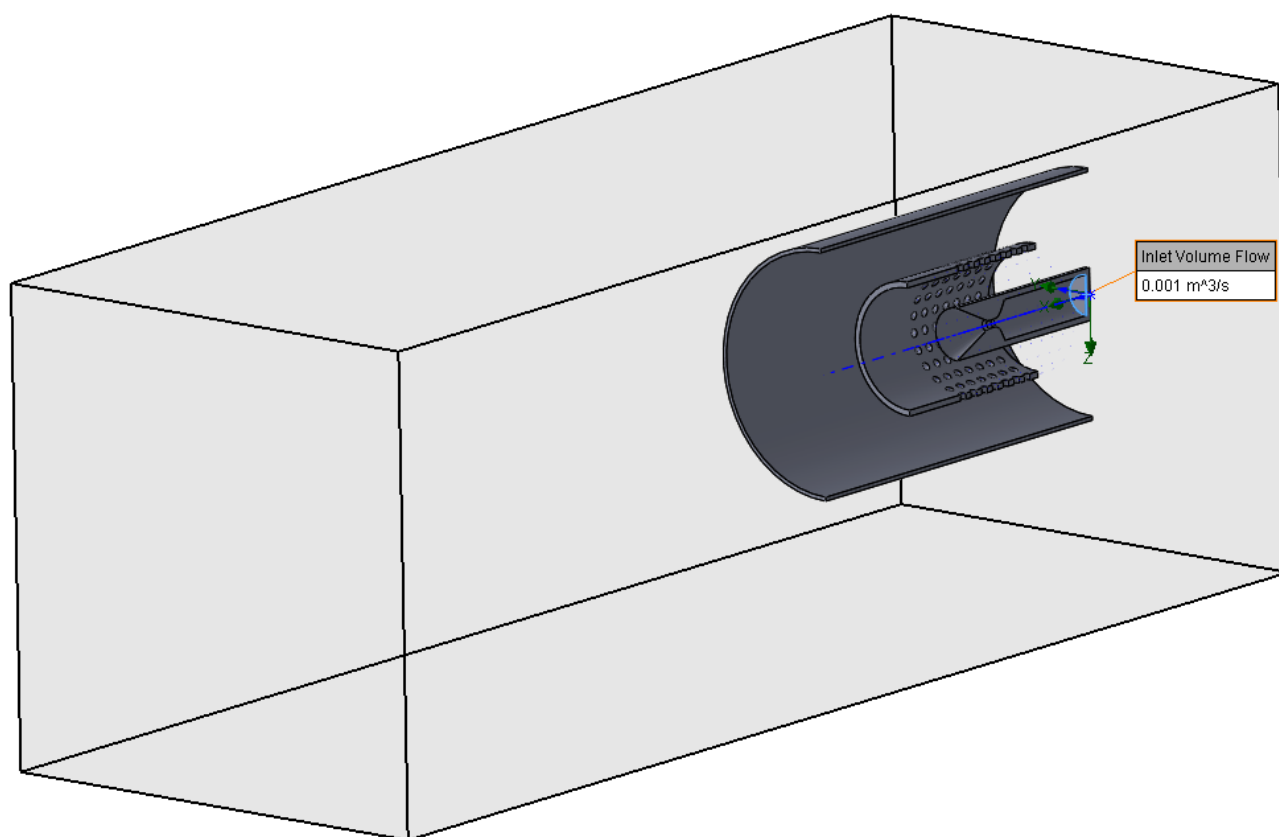


Рис 3.8 – Розрахункова модель 2



Рис 3.9 – Швидкість потоку води для схеми 1



Рис 3.10 – Тиск для схеми 1



Рис 3.11 – Масова фракція води для схеми 1

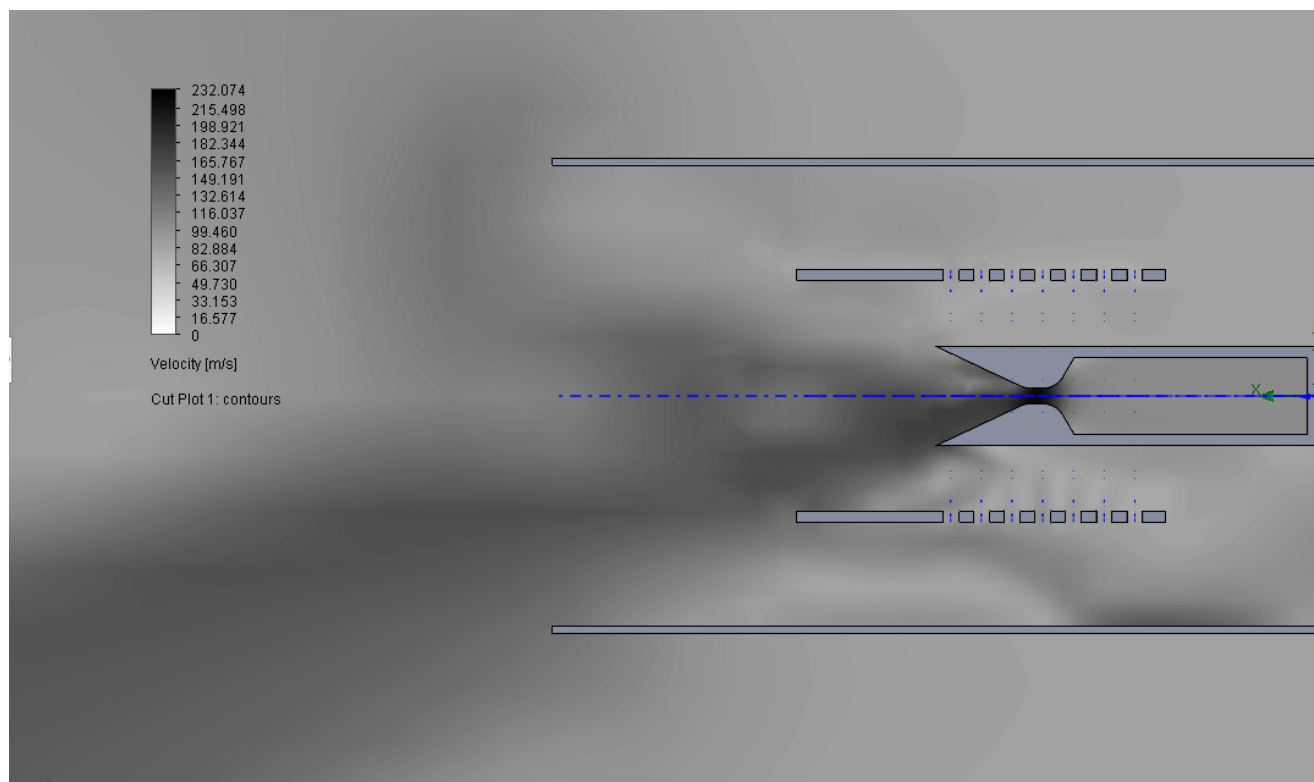


Рис 3.12 – Швидкість потоку води для схеми 1

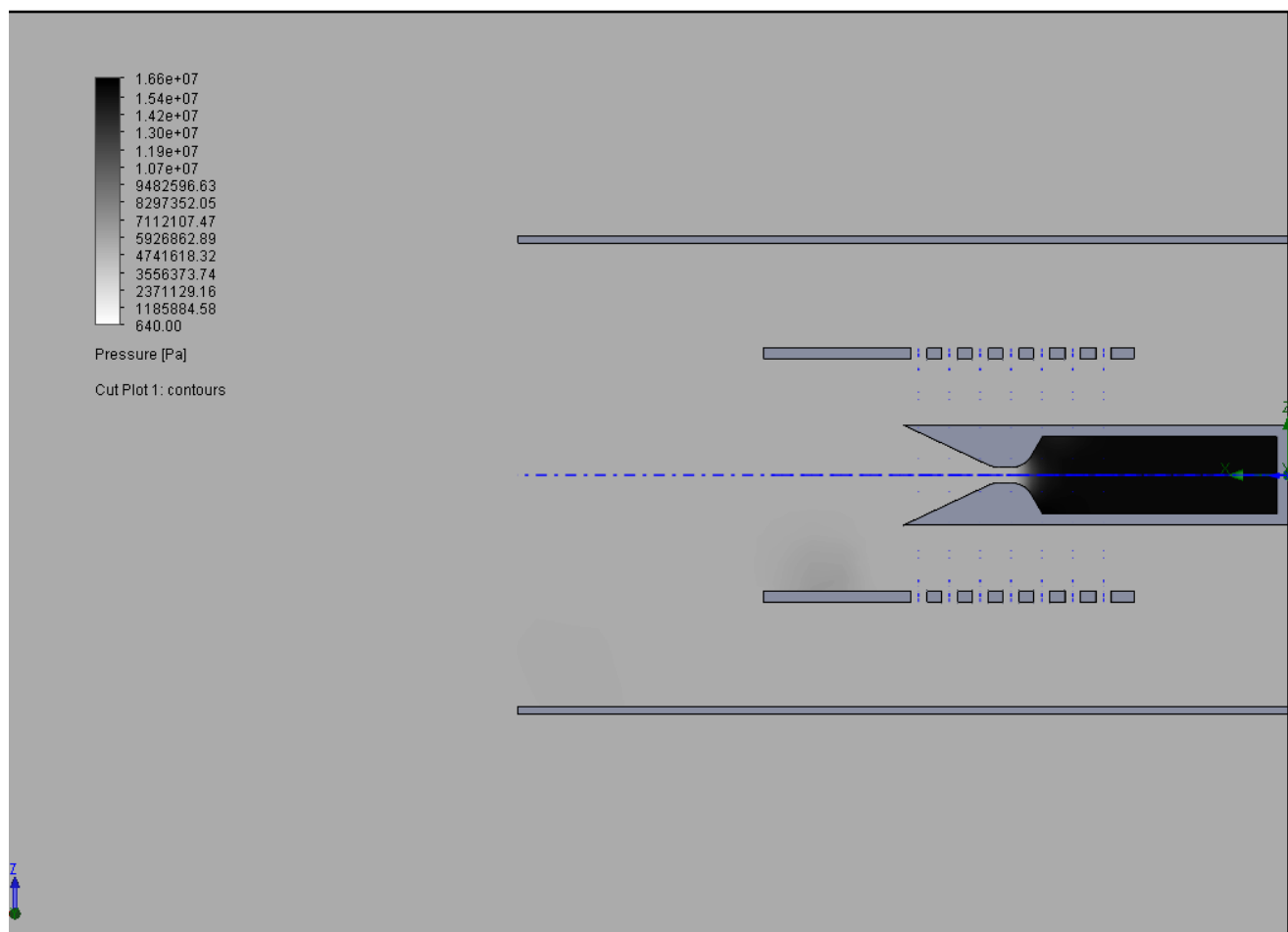


Рис 3.13 – Тиск для схеми 1

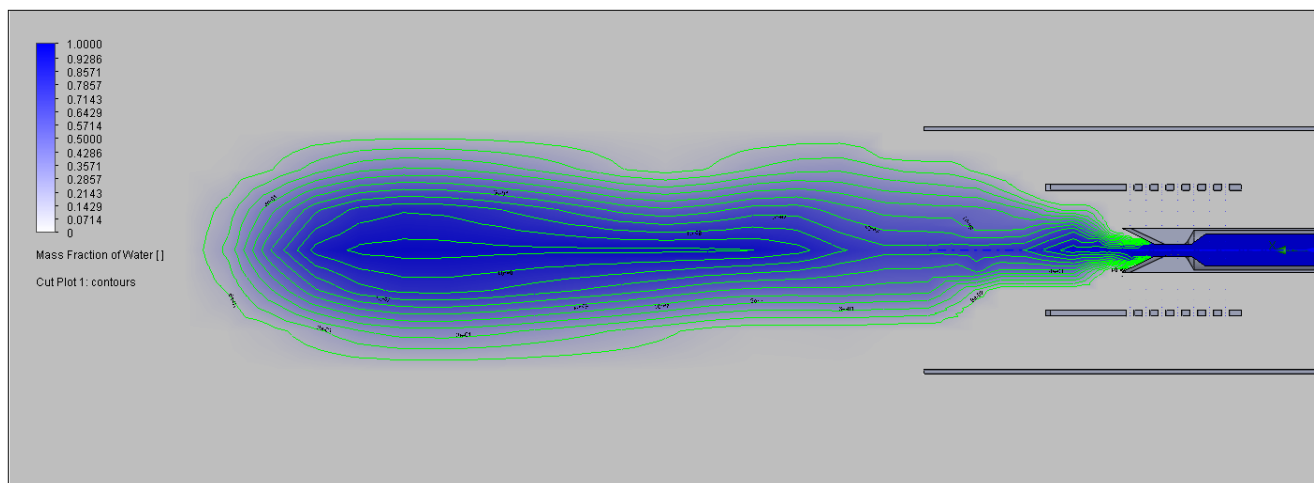


Рис 3.14 – Масова фракція води для схеми 1

У результаті порівняльного дослідження двох схем форсунок встановлено, що отримані залежності для визначення раціональних параметрів забезпечують потрібний рівень мінімального тиску та максимальної швидкості потоку для утворення кавітації. Однак в обох випадках конус розкриття досить не високий.

Одним зі шляхів збільшення кута розкриття конуса струменя є застосування повітря, яке б додатково розбивало б струмінь.

Таким чином, пропонується до форсунки додати ще один канал для подачі повітря, яке б розбивало струмінь (рис 3.15).

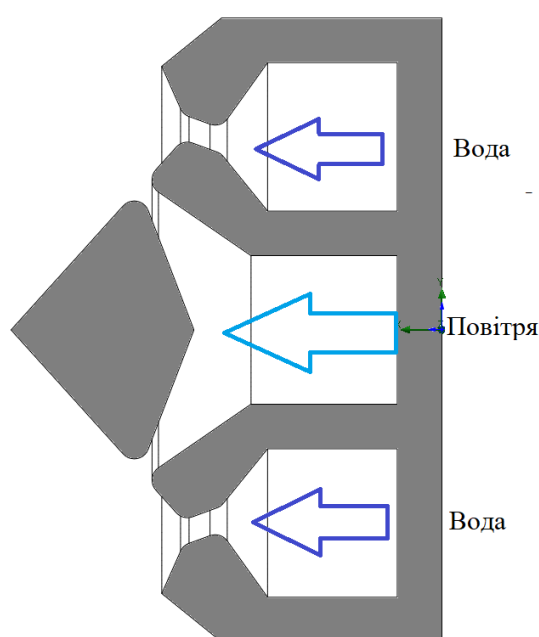


Рис 3.15 – Пропонована форсунка

Пропонована форсунка має центральний канал для повітря, який спрямовує його назовні у формі конуса, та зовнішній канал для води, який так само спрямовує потік води назовні під меншим кутом, ніж повітря.

Вихідні отвори визначення також за допомогою отриманих залежностей.

На рис 3.16 наведена розрахункова модель 3, на рис 3.17-3.19 – результати досліджень форсунки.

Як видно з наведених графіків, тиск та швидкість майже такі самі, як і у попередніх схемах, але кут розприскування значно більший і наближується до 30-35°.

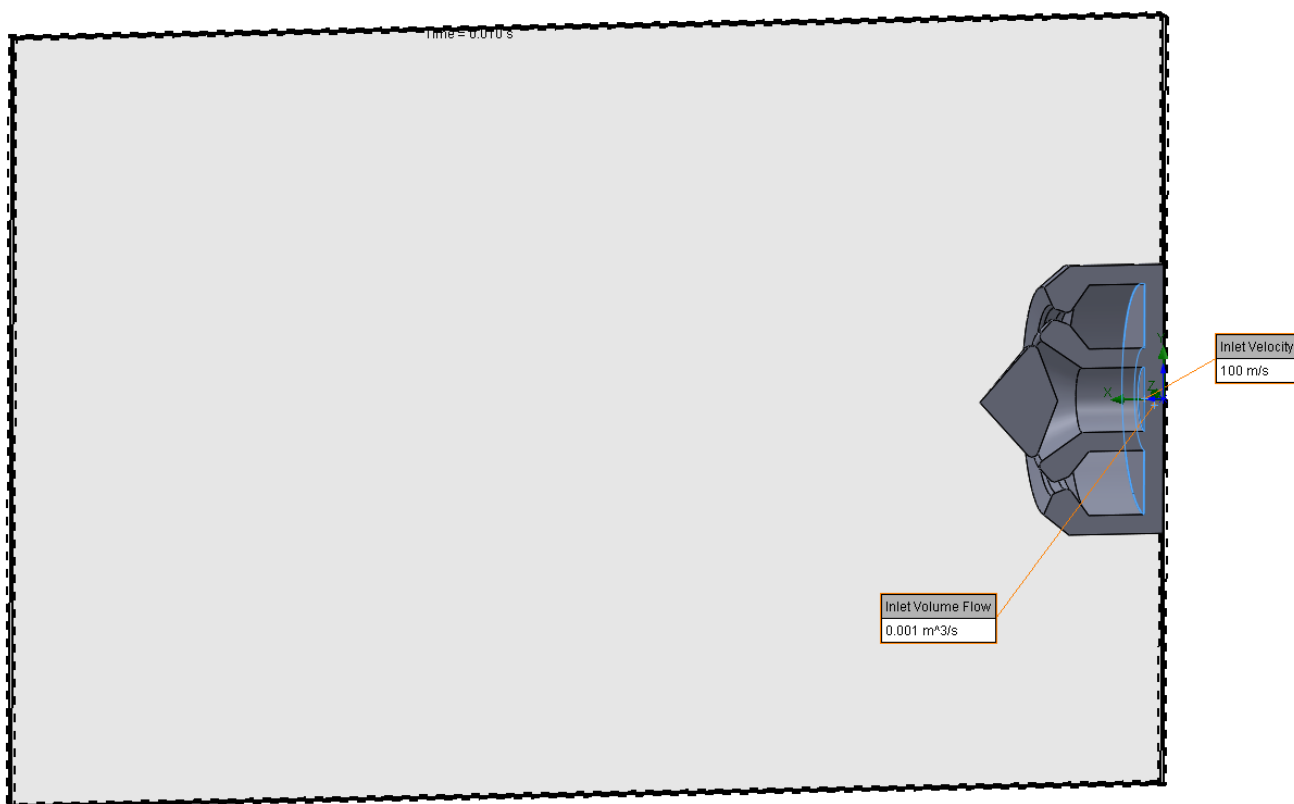


Рис 3.16 - Розрахункова модель 3



Рис 3.17 – Швидкість потоку води для схеми 3

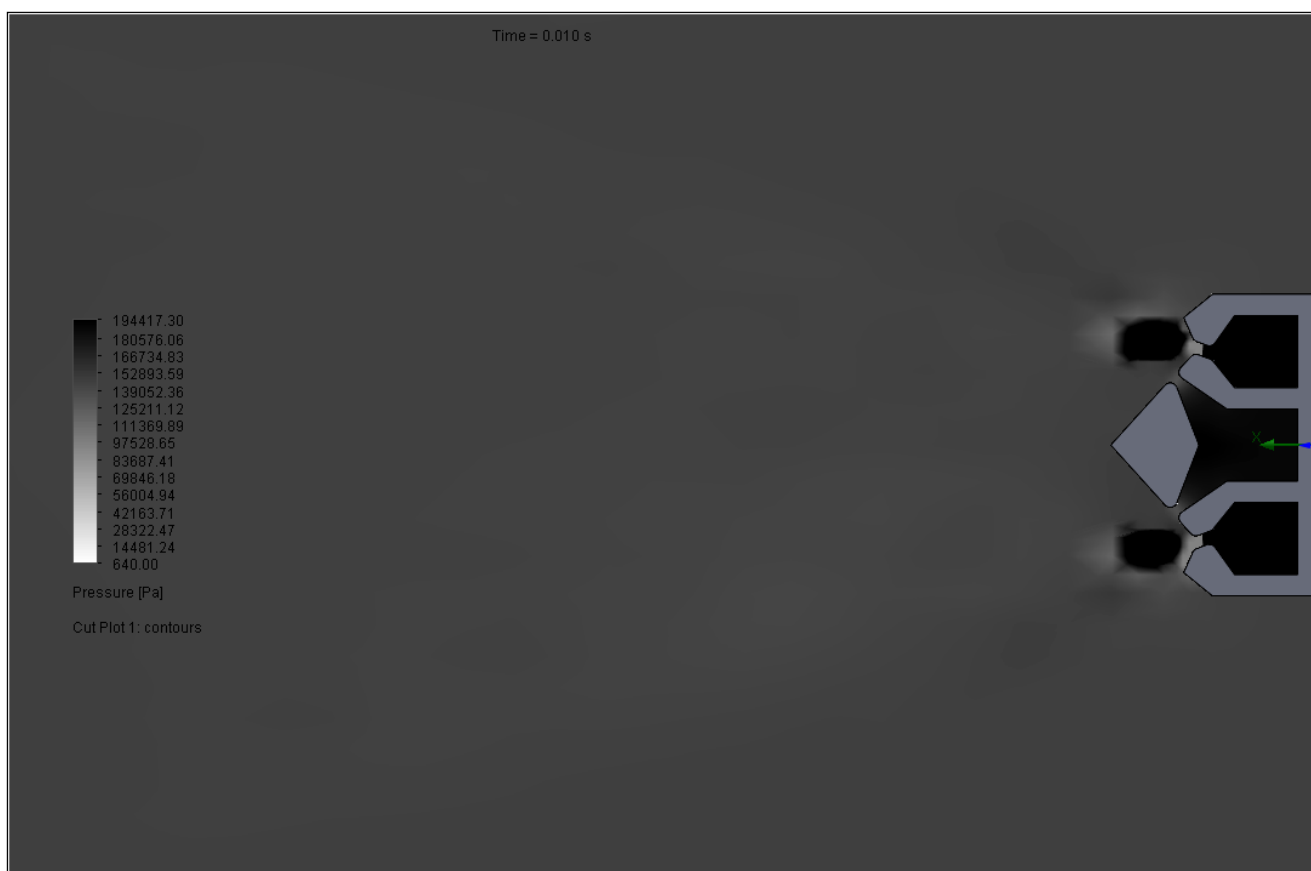


Рис 3.18 – Тиск для схеми 3



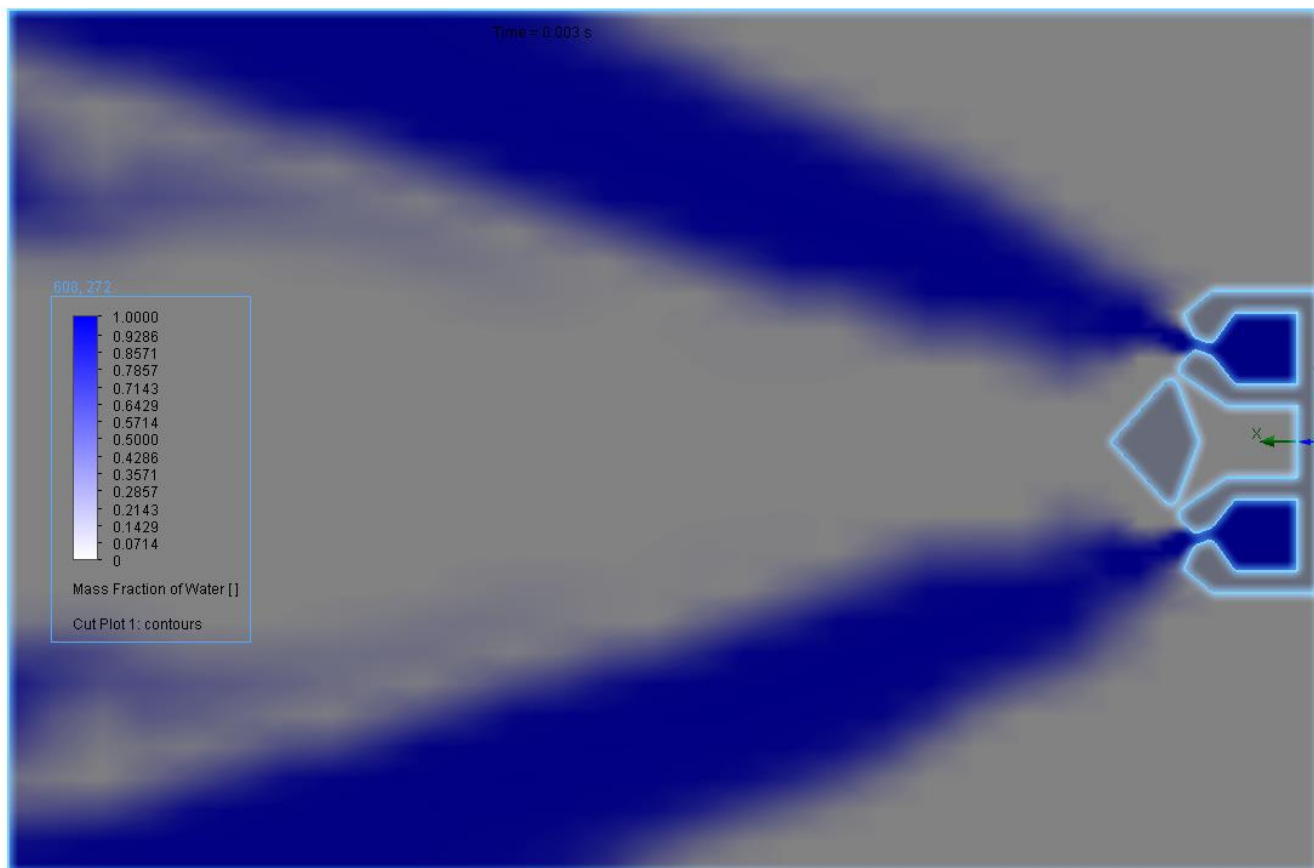


Рис 3.19 – Масова фракція води для схеми 3

### Висновки до розділу 3

1. На основі розробленої методики, проведено дослідження раціональних параметрів сопла Лаваля для форсунок пилоподавлення. Додатково визначено значення об'ємної частки пари, що дає змогу оцінити проходження кавітаційних процесів.
2. Встановлено квадратичну залежність мінімального тиску у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на мінімальний тиск у соплі має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – вхідна витрата води, а мінімальний вплив має значення діаметру вхідного патрубку.

3. Встановлено квадратичну залежність тиску на вході у сопло від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на тиск у вхідному патрубку має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
4. Встановлено квадратичну залежність максимальної швидкості води у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на максимальну швидкість води має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
5. Встановлено, що за швидкості руху води нижчою за 14 м/с та мінімального тиску більшому за 0,3 атм кавітація не настає за жодних інших умов. Перші ознаки кавітації починають проявлятися починаючи зі швидкості руху води біля 20-30 м/с та за мінімального тиску 0,1 атм, при швидкості біля 50 м/с і мінімальному тиску 0,05 атм кавітаційні процеси посилюються, а при швидкості більше 100 м/с і мінімальному тиску 0,01 атм спостерігається максимальний вплив кавітації.
6. Проведено порівняльне випробування двох конструкцій відомих форсунок. Встановлено, що в обох випадках струмінь води розповсюджується майже прямолінійно, кут розкриття конуса потоку не високи малий. Завдяки розрахованому діаметру критичного перетину, швидкість струменя досить висока.
7. Запропоновано конструкцію форсунки, що має центральний канал для повітря, який спрямовує його назовні у формі конуса, та зовнішній канал для води, який так само спрямовує потік води назовні під меншим кутом, ніж повітря. Вихідні отвори визначення також за допомогою отриманих залежностей. Отримано тиск та швидкість майже такі самі, як і у попередніх схемах, але кут розприскування значно більший і наближується до 30-35°.

## ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає в підвищенні ефективності процесу гідравлічного пилопригнічення за рахунок визначення раціональних параметрів форсунок розпилення.

1. Розроблено загальну методику подальшого дослідження, що дозволяє досягти поставленої мети роботи та покращити режим роботи форсунок пилоподавлення за рахунок обґрунтування раціональних експлуатаційних параметрів;
2. Проведено аналіз шляхів підвищення ефективності роботи форсунок пилоподавлення.
3. Встановлено, що одним зі шляхів підвищення ефективності роботи форсунок пилоподавлення є додаткове використання ефекту кавітації, яка може збільшити ефективність розсіювання води та краплеутворення через кавітаційний розрив та випаровування суцільного струменя води. Кавітація найчастіше виникає при досягненні тиску нижче рівня, необхідного для випаровування води за даної температури.
4. Встановлено, що визначальними параметрами є перепад площин вхідного перетину та вихідного отворів, оскільки кавітація може виникнути, якщо швидкість потоку рідини через звужені ділянки збільшується настільки, що тиск знижується. Таким чином, у подальшому дослідженні потрібно визначити раціональне співвідношення вхідної та вихідної швидкостей, або вхідного або вихідного діаметру.
5. Встановлено, що найкращим варіантом може бути використання сопла Лаваля для генерації зниження тиску та виникнення кавітації.
6. Розроблено методику дослідження форми вихідного отвору форсунки у формі сопла Лаваля, у якому визначаються геометричні параметри сопла форсунки, які б забезпечили утворення кавітації при заданому початковому діаметрі трубопроводу та витраті.

7. Розроблено методику порівняльного дослідження різних конструкцій форсунок пилоподавлення на основі розроблених залежностей для визначення раціональних параметрів форсунок, що сприяють появі кавітації, як додаткового ефекту для отримання тонкодисперсного водяного пилу з метою визначення конструкції форсунки, яка дає максимальний конус розприскування води.
8. На основі розробленої методики, проведено дослідження раціональних параметрів сопла Лаваля для форсунок пилоподавлення. Додатково визначено значення об'ємної частки пари, що дає змогу оцінити проходження кавітаційних процесів.
9. Встановлено квадратичну залежність мінімального тиску у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на мінімальний тиск у соплі має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – вхідна витрата води, а мінімальний вплив має значення діаметру вхідного патрубку.
10. Встановлено квадратичну залежність тиску на вході у сопло від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на тиск у вхідному патрубку має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
11. Встановлено квадратичну залежність максимальної швидкості води у соплі від вхідної витрати води, вхідного діаметру патрубку та співвідношення початкового та критичного діаметрів. Найбільший вплив на максимальну швидкість води має співвідношення початкового та критичного діаметрів, потім – діаметр вхідного патрубку, а мінімальний вплив має значення вхідної витрати води.
12. Встановлено, що за швидкості руху води нижчою за 14 м/с та мінімального тиску більшому за 0,3 атм кавітація не настає за жодних інших умов. Перші ознаки кавітації починають проявлятися починаючи зі швидкості руху води біля 20-30 м/с та за мінімального тиску 0,1 атм, при швидкості біля 50 м/с і

мінімальному тиску 0,05 атм кавітаційні процеси посилюються, а при швидкості більше 100 м/с і мінімальному тиску 0,01 атм спостерігається максимальний вплив кавітації.

13. Проведено порівняльне випробування двох конструкцій відомих форсунок. Встановлено, що в обох випадках струмінь води розповсюджується майже прямолінійно, кут розкриття конуса потоку не високи малий. Завдяки розрахованому діаметру критичного перетину, швидкість струменя досить висока.
14. Запропоновано конструкцію форсунки, що має центральний канал для повітря, який спрямовує його назовні у формі конуса, та зовнішній канал для води, який так само спрямовує потік води назовні під меншим кутом, ніж повітря. Вихідні отвори визначення також за допомогою отриманих залежностей. Отримано тиск та швидкість майже такі самі, як і у попередніх схемах, але кут розприскування значно більший і наближується до 30-35°.