

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

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Сергій  
ВАНЄВ  
(підпис)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023  
р.

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

на тему: Підвищення ефективності робочого сопла ежекторно-очисної установки  
на основі моделювання робочого процесу

Здобувача(ки) групи К.м-21

Дрижов А. В.

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

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

Керівник

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

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант

\_\_\_\_\_

Суми – 2023

## Зміст

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП.....                                             | 3  |
| 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....                  | 9  |
| 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СОПЛА ОЧИСНОЇ УСТАНОВКИ.....     | 8  |
| 2.1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ СОПЛА..... | 8  |
| 2.2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ СОПЛА.....          | 9  |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ПРОВЕДЕНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....                | 31 |
| 4. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....                           | 48 |
| ВИСНОВКИ.....                                          | 55 |
| СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....                                 | 56 |

|                   |                     |                 |               |             |                                                                             |                     |             |               |
|-------------------|---------------------|-----------------|---------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------|---------------|
|                   |                     |                 |               |             | <i>КМ 02.00.00.00 ПЗ</i>                                                    |                     |             |               |
|                   | <i>Лист</i>         | <i>№ докум.</i> | <i>Підпис</i> | <i>Дата</i> |                                                                             |                     |             |               |
| <i>Розроб.</i>    | <i>Дрижов А.В.</i>  |                 |               |             | Підвищення ефективності<br>робочого сопла<br>ежекторно-очисної<br>установки | <i>Лт.</i>          | <i>Лист</i> | <i>Листів</i> |
| <i>Перевірів.</i> | <i>Бага В.М.</i>    |                 |               |             |                                                                             |                     | 2           | 56            |
| <i>Реценз.</i>    |                     |                 |               |             |                                                                             | <i>СумДУ К.м-21</i> |             |               |
| <i>Н. Контр.</i>  | <i>Шарапов С.О.</i> |                 |               |             |                                                                             |                     |             |               |
| <i>Затверд.</i>   | <i>Ванєєв С.М.</i>  |                 |               |             |                                                                             |                     |             |               |

## ВСТУП

У даному дослідженні розглядається абразивоструменеве сопло, як ежектор, що використовує два потоки: повітряний і абразивний, із використанням річкового піску як абразиву. Суттєвими особливостями цієї установки є значна витрата повітря та швидке зношення робочого сопла.

Ежектор (від французького слова "éjecteur", що означає "викидати") є пристроєм, в якому передається кінетична енергія від рухливого середовища до іншого. У процесі змішування абразиву з повітрям відбувається взаємодія енергій між середовищами. Ежектори застосовуються в струменевих та вакуумних насосах та знаходять широке застосування в хімічній та нафтопереробній промисловості як змішувачі. Вони класифікуються за тиском як ежектори низького та високого тиску, з можливістю роботи під тиском до 10 атмосфер в ежекторно-очисних установках.

Ежектори широко використовуються в системах охолодження двигунів, паротурбінних установках, кондиціонерах, пульверизаторах, паливних системах двигунів внутрішнього згорання та інших галузях. Вони також використовуються для вентиляції приміщень, відкачування газів, виведення відпрацьованих газів, всмоктування атмосферного повітря через радіатори і розпилення масел та мазуту в форсунках.

Перша патентована абразивоструменева обробка належить американцю Бенджаміну Чу Тилгману в 1870 році. З того часу відбулося численне удосконалення абразивоструменевого апарату, введення піскоструминних камер та модернізація окремих деталей установки. Принцип роботи залишається незмінним - обробка поверхні матеріалу абразивом під високим тиском.

Абразивоструменева установка використовується для видалення забруднень та матеріалів з різних поверхонь, а за останні роки розширюється сфера застосування

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 3    |

піскоструменних апаратів і камер. Цей розвиток підтримується введенням нових матеріалів для абразивів і поліпшенням установок, а також ростом використання хімічних покриттів, які наносяться на чистий метал.

На сьогодні абразивоструменева обробка широко використовується для очищення металевих поверхонь, при цьому не ушкоджуючи їхню структуру. Виникнення нових матеріалів призводить до розширення сфери послуг із виконання піскоструменних робіт.

Основні переваги абразивоструменевої обробки, які визначають її актуальність сьогодення, включають:

1. Повна очистка металу від корозії та старих покриттів.
2. Можливість регулювання глибини очищення.
3. Здатність проводити поверхневе очищення металу.
4. Здатність видалення товстих шарів окалини та іржі.

Піскоструменна обробка металу дозволяє здійснювати знежирення поверхні, що є важливим перед фарбуванням, гальванічними операціями та газотермічним напиленням нового металу.

Процес абразивоструменевої обробки полягає у зіткненні потоку абразивного матеріалу, який має високу кінетичну енергію, з оброблюваною поверхнею. У деяких випадках після обробки може виникнути руйнування поверхні, що потрібно враховувати.

Абразивоструменевою обробці піддаються різні поверхні, такі як метал, бетон, цегла, природний камінь, скло, дерево, ємності, будівлі, механізми і деталі, мости і т. д. Кварцевий пісок дрібної фракції (0,5-0,1) часто використовується як абразив. Залежно від тиску і якості абразиву, абразивоструменева обробка надає різну шорсткість поверхні:

1. Жорстка.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 4    |

2. Звичайна.
3. Очищення сталеві поверхні майже до блиску.
4. Очищення сталеві поверхні до повного блиску.

Всі матеріали вимагають абразивоструменевої обробки поверхні для надання їй шорсткості та очищення. Порівняно зі звичайною ручною обробкою шліфувальною машиною, швидкість обробки за допомогою піскоструменного обладнання в сотні разів вища.

Отже, передпроцесинг поверхні за допомогою абразивоструменевого обладнання є ефективним методом очищення, що створює гарну основу для нанесення різних видів довговічного покриття. Для оптимальної роботи піскоструменевого апарату важливо провести дослідження щодо правильного вибору його компонентів, таких як компресор з високою продуктивністю, пневмережа, піскоструменний апарат, сопло, пульт дистанційного управління, вологовідокремлювач та очищувач повітря, витратний матеріал, захисний шолом і сушильна камера для відпрацьованого абразиву. Незважаючи на існуючі експериментальні дані, існують можливості для підвищення ефективності, які вимагають додаткових досліджень.

|             |             |                 |                |             |                          |             |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|--------------------------|-------------|
|             |             |                 |                |             | <i>КМ 02.00.00.00 ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм.</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> |                          | 5           |

## Ежекторно-очисна установка



Рисунок 1.1 – Схема ежекторно-очисної установки

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У цьому дослідженні проводилися як експериментальні, так і чисельні випробування роботи робочого сопла ежекторно-очисної установки.

Для забезпечення можливості чисельного аналізу була створена розрахункова модель проточної частини вивчених сопел. Твердотільні моделі були розроблені в CAD-системах. Створені варіанти проточних частин різних геометрій робочих сопел експортувалися в форматі (Parasolid) у Solid Works 2020 та потім у форматі (\*.stl).

Експериментальні дослідження проводилися на спеціальній установці для аналізу абразивоструменевої установки.

**Метою роботи** було підвищення ефективності роботи робочого сопла ежекторно-очисної установки шляхом впливу на його геометрію.

Для досягнення цієї мети ставилися наступні **завдання**:

Чисельне та експериментальне вивчення робочого процесу повітряно-абразивної суміші в робочому соплі.

Зниження вартості робочого сопла шляхом підвищення його зносостійкості.

Адаптація ежекторно-очисної установки до роботи при знижених значеннях тиску.

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ СОПЛА ОЧИСНОЇ УСТАНОВКИ

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 7    |

Були проведені чисельні та експериментальні дослідження течії пісчано-повітряного потоку в очисній установці з використанням ежектора. Чисельні дослідження були виконані за допомогою програмного комплексу ANSYS. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії кафедри ТТФ на уніфікованому експериментальному стенді для дослідження ежектора очисної установки (піскоструминної).

## 2.1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ

Сучасний розвиток науки та техніки відкриває нові можливості по моделюванню складних фізичних процесів течії двуфазного потоку. Крім того, використання гідродинамічних програмних комплексів при моделюванні течії абразивного матеріалу через робоче сопло, за допомогою візуалізацій, дає змогу познайомитися з багатьма процесами які не можуть бути відтворені більше ніякими іншими способами. Однак при цьому зберігається визначальна роль натурального експерименту, оскільки, в кінцевому рахунку, тільки натурний експеримент має беззаперечні аргументи в сучасному науковому середовищі.

Методи розрахунку і проектування робочих сопел базуються на експериментальних даних, узагальнених в тій чи іншій мірі [1-4]. Глибоке дослідження ряду вітчизняних і зарубіжних праць суттєво розширили уявлення про характер і особливості робочого процесу течії двуфазного середовища.

Поставлена задача більш детального експериментального і теоретичного дослідження процесів, що протікають в робочому соплі ежекторно-очисної установки з метою підвищення їх ефективності.

Проведено експериментальні дослідження впливу тиску на виході з сопел на величину коефіцієнта витoku сопла, а також здійснено чисельне моделювання потоку газу в критичному соплі за різних значень відношення тисків на ньому.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 8    |







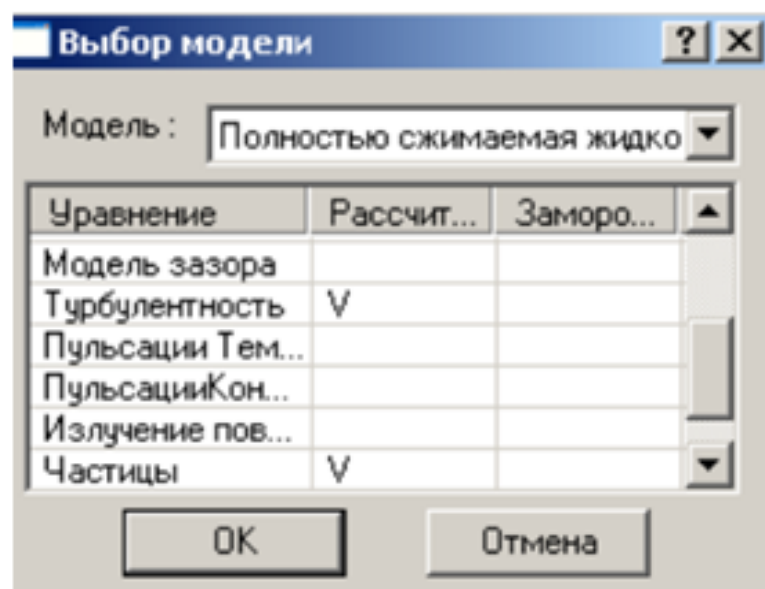
Частка - або крапля рідкого палива, або твердий кулька, що містить зумовлені масові частки води, летючих, коксу та золи.

Рідка крапля нагрівається і випаровується. До досягнення температури кипіння випаровування відбувається в конвективному режимі. Після досягнення температури кипіння - в режимі кипіння.

Характеристики частинок задаються звичайним чином у вікні властивостей елемента Частинки.

### Частинки

Модель призначена для моделювання двофазних течій з частинками. Несуча фаза може бути рідиною або газом. Частинки можуть бути твердими кульками, краплями, або бульбашками.



Малюнок 2.1 Вибір Моделі

Для чисельного моделювання використовувався програмний комплекс, який ефективно вирішує ряд практичних завдань, серед яких моделювання течії в проточних частинах турбін, компресорів, насосів, азів і рідин по каналах трубопроводах і т.д.

Модель Частинки працює спільно з усіма моделями течії. Завжди передбачається взаємний вплив фаз, тобто несуча фаза визначає траєкторії частинок, частинки в свою чергу впливають на перебіг через джерела маси, імпульсу (т. е. силу опору, що діє на несучу фазу) і енергії.

Комплекс заснований на чисельному рішенні тривимірних стаціонарних і нестаціонарних рівнянь динаміки рідини і газу, які включають в себе закони збереження маси, імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса), рівняння стану. Для розрахунку складних рухів рідини і газу, супроводжуваних додатковими фізичними явищами турбулентності, контактних меж розділу, теплопереносу, в математичну модель включаються додаткові рівняння, що описують ці явища.

Моделювання процесів руху дисперсійного середовища. 2.2.1. Рівняння руху і енергії Числове дослідження руху рідини можна проводити на підставі диференціального рівняння Наве - Стокса. Це рівняння слідує з рівняння переносу імпульса, якщо в нього підставити вираження для тензора в'язких напружень з 80 урахуванням об'ємної в'язкості

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{v}\bar{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \{ \mu[\nabla\bar{v}] + (\nabla\bar{v}_c) \} + \nabla \left[ \left( \chi - \frac{2}{3}\mu \right) (\nabla \cdot \bar{v}) + \rho\bar{F} \right], \quad (2.1)$$

де  $\rho$  - густина,  $p$  - тиск;  $\mu$  - динамічна в'язкість,  $\chi$  - об'ємна в'язкість;  $\rho v$  - лінійна швидкість руху середовища,  $\rho F$  - вектор масових сил, діючих на одиницю маси речовини. У випадку нестискуваної рідини ( $\rho = \text{const}$ ),  $\nabla \cdot = v \ 0$   $\rho$  рівняння запишеться в вигляді:

$$\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}\bar{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \{ \nu[\nabla\bar{v} + (\nabla v_c)] \} + \bar{F}, \quad (2.2)$$

де  $\nu = \mu/\rho =$  - кінематична в'язкість. Якщо  $\mu = \text{const}$ , рівняння Нав'є - Стокса прийме вигляд:

$$\frac{\partial\bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{v}\bar{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \bar{v} + \bar{F}. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.3) є класичною формою рівняння Нав'є - Стокса, що використовується в механіці рідини і газу. Для рішення задачі про рух оброблюваного в перетині апарату матеріалу розглядаються двомірні стаціонарні рівняння. Відомо, що числові дослідження двомірних стаціонарних рівнянь руху рідини можна робити в динамічних змінних (компоненти швидкості), або в

|              |              |                      |                    |              |  |  |  |  |              |
|--------------|--------------|----------------------|--------------------|--------------|--|--|--|--|--------------|
|              |              |                      |                    |              |  |  |  |  | Лист<br>Лист |
|              |              |                      |                    |              |  |  |  |  | 13           |
| Изм.<br>Изм. | Лист<br>Лист | № докум.<br>№ докум. | Подпись<br>Подпись | Дата<br>Дата |  |  |  |  |              |

КМ 02.00.00.00 ПЗ

змінних Гельмгольца (завихоренність, функція току). При цьому рівняння дифузії і енергії в першому і в другому випадках залишаються без змін. Для рішення задачі скористуємось системою рівнянь руху рідини Гельмгольца. В цих змінних міститься на одне рівняння менш, ніж в динамічних - явно не міститься тиск  $P$ , що може бути визначений з рівняння Нав'є - Стокса. Система рівнянь в змінних Гельмгольца зручна для проведення розрахунку, коли в краєвих умовах не міститься тиску. Інша перевага полягає в однотипності всіх рівнянь, що особливо важливо при реалізації рішення на компютерах. Побудуємо математичну модель двомірної стаціонарної течії вязкої рідини в криволінійній неортогональній системі координат. Стаціонарне рівняння Нав'є - Стокса для рідини, що стискається, при постійній динамічній в'язкості  $\mu$  має вигляд:

$$\rho(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + (\mu/3 + \chi)\nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{F}; \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0. \quad (2.5)$$

Щоб перейти до змінних Гельмгольца, скористуємось векторними тотожностями.

$$(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} = \nabla(\vec{v}^2 / 2) - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v});$$

$$\nabla^2 \vec{v} = \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) - \nabla \times \nabla \times \vec{v}.$$

Тоді рівняння (2.4) запишеться наступним чином:

$$\rho \nabla(\vec{v}^2 / 2) - \rho \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v}) = -\nabla p - \mu \nabla \times \nabla \times \vec{v} + (4\mu/3 + \chi)\nabla(\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \vec{F}. \quad (2.6)$$

Застосуємо оператор ротор до обох частин рівності (2.6). Враховуючи, що  $\nabla \times (\nabla f) = 0$  для довільної функції, отримаємо:

$$\nabla \times (\rho \nabla K) - \nabla \times (\rho \vec{v} \times \vec{\omega}) = -\mu \nabla \times \nabla \times \vec{\omega} + \nabla \times (\rho \vec{F}), \quad (2.7)$$

де  $K = \vec{v}^2 / 2$  питома інтенсивна енергія;  $\vec{\omega} = \nabla \times \vec{v}$  вектор завихоренності.

Використовуючи тотожність

$$\nabla \times (\rho \nabla K) = \rho \nabla \times (\nabla K) + (\nabla \rho) \times (\nabla K) = (\nabla \rho) \times (\nabla K)$$

перетворимо рівняння (2.7) до вигляду:

$$-\nabla \times (\rho \vec{v} \times \vec{\omega}) + (\Delta p) \times (\nabla K) = \mu \nabla \times \nabla \times \vec{\omega} + \nabla \times (\rho \vec{F}) \quad (2.8)$$

В двовірному випадку немає необхідності робити подальші перетворення, бо в вхідній системі рівнянь основними змінними є  $\omega_3$ -проекція вектору завихоренності на вісь  $X^3$ , функція току  $\psi$  і компонент швидкості  $v_3$ .

Рівняння для **завихоренності**  $\omega_3$  отримаємо, множачи скалярно вираз (2.8) на вектор  $\vec{l}_3$  [118].

Отримаємо

$$\nabla \cdot \left( \rho \vec{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \mu \nabla \cdot \left[ \frac{1}{H_3^2} \nabla (H_3 \omega_3) \right] + \frac{1}{H_3} \vec{l}_3 \cdot \left[ \nabla \left( \frac{\rho v_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla \rho + \nabla \times (\rho \vec{F}) \right] \quad (2.9)$$

В двовірному стаціонарному випадку завжди можна ввести тотожно функцію току, що задовольнить рівнянням нерозривності. Множачи скалярно рівняння завихоренності на вектор  $\vec{l}_3$ , маємо:

$$\vec{\omega} \cdot \vec{l}_3 = \vec{l}_3 \cdot (\nabla \times \vec{v}).$$

В координатній формі воно буде мати вигляд:

$$\frac{g_{33}}{\sqrt{g}} \left( \frac{\partial v_1}{\partial x^2} - \frac{\partial v_2}{\partial x^1} \right) + \omega_3 = 0.$$

Якщо ввести функцію току шляхом співвідношення

$$v^1 = \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^2}; \quad v^2 = - \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial x^1}; \quad (2.10)$$

то отримаємо рівняння для визначення функції току. В векторній формі це рівняння запишеться так

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \nabla \psi \right) + \omega_3 = 0. \quad (2.11)$$

При математичному моделюванні руху рідини в специфічних апаратах промисловості будматеріалів (циклони, сепаратори, класифікатори та ін.) часто виникають двовірні задачі, в яких ці функції залежать тільки від координат  $X_1$  і  $X_2$ , а вектор швидкості  $\vec{v}$  має три відмінні від нуля компоненти  $v_1, v_2, v_3$ . Тому представляє інтерес дослідження вісесиметричного закрученого потоку. **Рівняння для  $v_3$**  отримаємо, множачи скалярно вираз (2.6) на вектор  $\vec{l}_3$  з урахуванням незалежності розподілу скалярних параметрів від  $X_3$

$$-\vec{l}_3 \cdot [\rho \vec{v} \times (\nabla \times \vec{v})] = - \frac{1}{H_3} \frac{\partial p}{\partial x_3} - \mu \vec{l}_3 \cdot (\nabla \times \nabla \times \vec{v}) + p \vec{F}_3 \quad (2.12)$$

В рівнянні (2.12) збережений член  $\partial p / \partial x_3$ , тобто є процеси, в математичних моделях яких тиск залежить лінійно від  $X_3$ , а  $\partial p / \partial x_3$  - відома функція.

$$\nabla \cdot (\rho \bar{v} H_3 v_3) = \mu \nabla \cdot \left[ H_3^2 \nabla \left( \frac{v_3}{H_3} \right) \right] + 2\mu H_3 v_3 \nabla^2 (\ell_n H_3) - \frac{\partial p}{\partial x_3} + H_3 \rho F_3. \quad (2.13)$$

В рівнянні (2.13) друга складова перетворюється в нуль, якщо  $\ell_n H_3$  представляє собою гармонійну функцію координат  $X_1, X_2$ , що справедливо для площинних і вісесиметричних потоків.

Більшість технологічних процесів і виробництв будівельних матеріалів зв'язано з використанням тепла. В одних випадках тепловий вплив на матеріал застосовується для придання матеріалу визначених технологічних властивостей. В інших - тепловий вплив є головним і навіть єдиним технологічним процесом, що забезпечує перетворення вихідної сировини в закінчений продукт.

Багато технологічних і експлуатаційних властивостей машин і апаратів будівельної індустрії, що використовуються для виготовлення матеріалу та конструкцій, значною мірою залежать від раціонального режиму теплової обробки при використанні відповідного устаткування. Ці ж фактори визначають і економічні показники технології.

Велика кількість різних видів будівельних матеріалів і методів їхнього виробництва визначають різноманіття форм використання тепла, температурних режимів і часу теплового впливу.

Для моделювання теплового впливу на матеріал, скористаємося **рівнянням енергії**. Якщо рідина є однокомпонентною, то рівняння має вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{v} u) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{\rho} \nabla T \right) + \nu \Phi_v. \quad (2.14)$$

При постійній теплоємності  $u = cT + u^0$  рівняння (2.11) запишеться

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{v} T) = \nabla \cdot (a \nabla T) + \frac{\nu}{c} \Phi_v, \quad (2.15)$$

де  $a = \lambda / c\rho$  - температуропровідність рідини,

$\Phi_v$  - дисипативна функція Релея, що є тепловий еквівалент механічної потужності, витраченої в процесі деформації рідини унаслідок в'язкості.

Дисипативну функцію можна визначити з залежності

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (\bar{v}T) = f\nabla^2 T. \quad (2.16)$$

У задачах про теплообмін у багатокомпонентних середовищах найбільше часто використовують дифузійне наближення. При цьому дифузійні швидкості враховуються тільки в рівняннях компонентної дифузії й у вираженнях для дифузійного потоку енергії. Вплив складу суміші враховується за допомогою фізико-хімічних параметрів, таких як в'язкість, теплопровідність і теплоємність, а також рівняннями стану.

2.2.2. Рівняння завихореності в тензорній формі для криволінійної неортогональної системи координат.

Рівняння завихореності у векторній формі має вигляд:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left( \rho \bar{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) &= \mu \nabla \cdot \left[ \frac{1}{H_3^2} \nabla (H_3 \omega_3) \right] + \\ & \frac{1}{H_3} \bar{\ell}_3 \cdot \left[ \nabla \left( \frac{\rho v_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla p + \nabla \times (\rho F) \right]. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Побудуємо математичну модель для двомірної стаціонарної течії рідини в криволінійній неортогональній системі координат  $X_1, X_2, X_3$ .

Для лівої частини рівняння (2.17) виконаємо наступні перетворення:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left( \rho \bar{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) &= \bar{\ell}^m \cdot \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^n \bar{\ell}_n \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \delta_n^m \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \bar{\ell}^m \cdot \frac{\partial \bar{\ell}_n}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \\ &= \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \Gamma_{mn}^m \rho v^n \frac{\omega_3}{H_3} = \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} \right) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \sqrt{g}}{\partial \bar{x}^m} \rho v^m \frac{\omega_3}{H_3} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \bar{x}^m} \left( \rho v^m \sqrt{g} \frac{\omega_3}{H_3} \right), \end{aligned} \quad (2.18)$$

де -  $\bar{\ell}^m, \bar{\ell}_n$  - базисний координатний вектор;  $\sqrt{g}$  - коефіцієнт об'єму;  $\delta_n^m$  - символ Кронекера;  $\Gamma_{mn}^m$  - символ Кристофеля 2 роду.

Однак, при рішенні задачі в змінних Гельмгольца зручніше визначити  $\nabla \cdot (\rho \bar{v} \omega_3 / H_3)$  через функцію току  $\psi$ . Підставивши значення компонент швидкості



$$\nabla \cdot \left( \rho \tilde{v} \frac{\omega_3}{H_3} \right) = \varepsilon^{3mn} \frac{\partial}{\partial x^m} \left( \frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} \right) \frac{\partial \psi}{\partial x^n}, \quad (2.19)$$

де  $\tilde{\omega}_3 = \omega_3 / H_3$ ;  $\varepsilon^{3mi}$  - тензор Леві-Чівітта.

Перетворюючи перший член правої частини (2.17), отримаємо:

$$\begin{aligned} \mu \nabla \cdot \left[ \frac{1}{H_3} \nabla (H_3 \omega_3) \right] &= \mu \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{H_3} \left[ \tilde{l}^m \frac{\partial}{\partial x^m} (H_3 \omega_3) \right] \right\} = \\ &= \mu \nabla \cdot \left\{ \frac{1}{H_3^2} \left[ \tilde{l}_k g^{km} \frac{\partial}{\partial x^m} (H_3 \omega_3) \right] \right\} = \nabla \cdot \left[ \frac{\mu}{H_3^2} \tilde{l}_k g^{km} \frac{\partial}{\partial x^m} (H_3 \omega_3) \right] = \\ &= \delta_k^n \frac{\partial}{\partial x^n} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{kn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] + \tilde{l}^m \frac{\partial \tilde{l}_k}{\partial x^m} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{kn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] = \\ &= \frac{\partial}{\partial x^n} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{mn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] + \Gamma_{mk}^n \frac{\mu}{H_3^2} g^{kn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) = \\ &= \frac{\partial}{\partial x^n} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{mn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial \sqrt{g}}{\partial x^k} \frac{\mu}{H_3^2} g^{kn} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) = \\ &= \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^n} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{mn} \sqrt{g} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Другий член правої частини рівняння (2.17) в тензорній формі буде мати вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{1}{H_3} \tilde{l}_3 \cdot \left[ \nabla \left( \frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \times \nabla H_3 + \nabla K \times \nabla \rho + \nabla \times (\rho \vec{F}) \right] &= \\ = \varepsilon^{3\alpha\beta} \left( \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left( \frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \frac{\partial H_3}{\partial x^\beta} + \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left( \frac{\tilde{v}^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x^\beta} + \frac{\partial \rho F_\beta}{\partial x^\alpha} \right); \quad \alpha=1,2 \end{aligned} \quad (2.21)$$

Таким чином рівняння (2.17) можливо представити в тензорній формі:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{3mn} \frac{\partial}{\partial x^m} \left( \frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} \right) \frac{\partial \varphi}{\partial x^n} &= \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial x^m} \left[ \frac{\mu}{H_3^2} g^{mn} \sqrt{g} \frac{\partial}{\partial x^n} (H_3 \omega_3) \right] + \\ &= \varepsilon^{3mn} \left( \frac{\partial}{\partial x^m} \left( \frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \frac{\partial H_3}{\partial x^n} + \frac{\partial H_3}{\partial x^m} \left( \frac{\tilde{v}^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial x^n} + \frac{\partial \rho F_n}{\partial x^m} \right) \end{aligned} \quad (2.22)$$

В координатній формі для площини, рівняння для визначення завихореності (2.18) запишеться наступним чином

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left( \rho \frac{\sqrt{g} v^1 \tilde{\omega}_3}{H_3} \right) = \\
& = \frac{\mu}{\sqrt{g}} \left[ \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^1} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \frac{g^{11} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{11} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{(\partial \alpha^1)^2} + \right. \\
& \quad + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^1} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \frac{g^{12} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{12} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^1 \partial \alpha^2} + \\
& \quad + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \frac{g^{21} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{21} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^2 \partial \alpha^1} + \\
& \quad \left. + \frac{\partial(H_3 \tilde{\omega}_3)}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \frac{g^{22} \sqrt{g}}{H_3^2} + \frac{g^{22} \sqrt{g}}{H_3^2} \cdot \frac{\partial^2(H_3 \tilde{\omega}_3)}{(\partial \alpha^2)^2} \right] + \\
& \quad + \frac{1}{\sqrt{g}} \left[ \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left( \frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \cdot \left( \frac{\partial H_3}{\partial \alpha^2} \right) - \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left( \frac{\rho \tilde{v}_3^2}{H_3} \right) \cdot \left( \frac{\partial H_3}{\partial \alpha^1} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left( \frac{\tilde{v}^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial \alpha^2} - \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left( \frac{\tilde{v}^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial \alpha^1} + \frac{\partial(\rho F_2)}{\partial \alpha^1} - \frac{\partial(\rho F_1)}{\partial \alpha^2} \right]
\end{aligned} \tag{2.23}$$

де

$$\begin{aligned}
\tilde{v}_3 &= v_3 / H_3; & \tilde{\omega} &= \omega_3 / H_3; \\
\tilde{v} &= (v^1)^2 g_{11} + (v^2)^2 g_{22} + 2v^1 v^2 \cdot g_{12};
\end{aligned}$$

$g^j(g_j)$ -контрваріантні (коваріантні) компоненти метричного тензора в V-об'ємі (початковому об'ємі).

### 2.2.3. Рівняння функції току

Перетворюючи рівняння функції току (2.11) до тензорної форми запису і виходячи з тих же позицій як під час виводу формули (3.20), можемо записати:

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{g} \rho} \nabla \psi \right) + \omega_3 = \frac{g_{33}}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \alpha^m} \left( \frac{g^{mn} \sqrt{g}}{g_{33} \rho} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha^n} \right) + \omega_3 = 0,$$

або

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \alpha^n} \left( \frac{g^{mn} \sqrt{g}}{\rho H_3^2} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha^n} \right) + \frac{\tilde{\omega}_3}{H_3} = 0, \tag{2.24}$$

де  $\tilde{\omega}_3 = \omega_3 / H_3$ ;  $H_i$  - коефіцієнти Ляме при  $i = 1, 2, 3$ .

Залежність між функцією току і швидкістю визначається з виразу:

$$v^1 = \frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha^2}; \quad v^2 = -\frac{1}{\rho \sqrt{g}} \frac{\partial \psi}{\partial \alpha^1}. \tag{2.25}$$

..



Стосовно до досліджуваного сопла необхідно адаптувати розрахункову сітку до його геометрії (щілинному зазору з гострою кромкою). Дане завдання здійснене побудовою досить точної розрахункової сітки нульового рівня таким чином, щоб в радіальному зазорі  $s = 7$  мм містилося близько 30 осередків максимально наближених до квадратної форми (рисунок 2.2).

Збіжність результатів розрахунку оцінювалася за інтегральними характеристиками у вхідному і вихідному перетинах ущільнення.

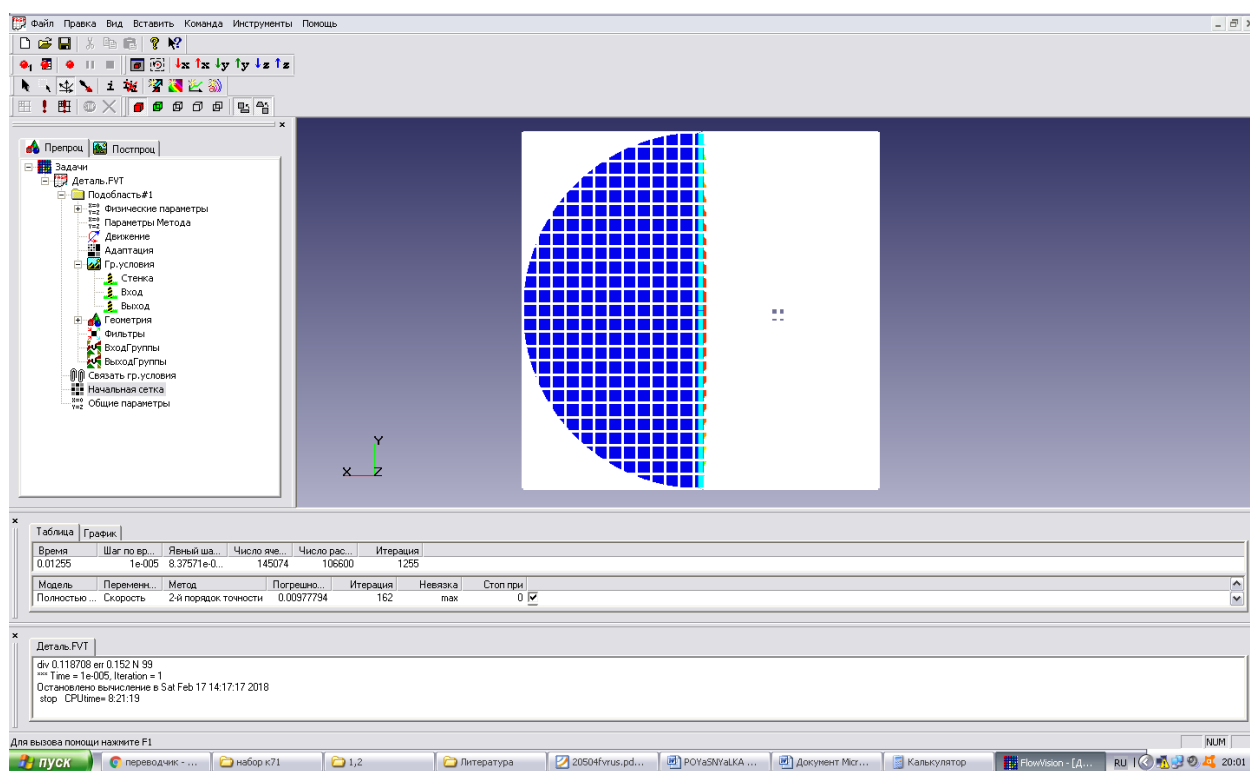


Рисунок 2.2 Розрахункова сітка сопла

Проведена серія розрахунків сопла нас різних розрахункових сітках. В результаті було вибрано раціональну кількість розрахункових осередків рівну  $N = 110000$ . За найпоширенішим для подібних завдань моделям турбулентності (SST, стандартна  $k - \varepsilon$ , SA, низько - Рейнольдсоя модель AKN) .

Виконана серія порівняльних розрахунків, що не виявила суттєвих розбіжностей між ними.

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | 20   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |      |



# Алгоритм моделювання

## в пакеті ANSYS

Нижче наведена розрахункова модель (рисунок 2.4 – 2.6).

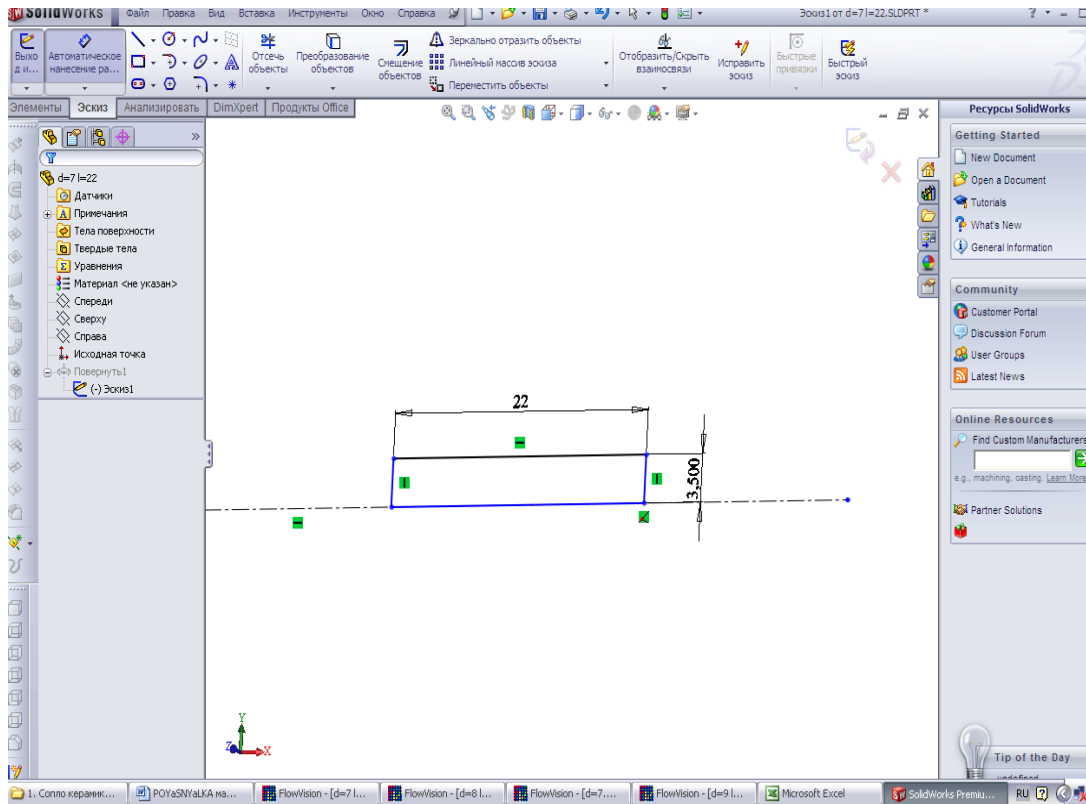


Рисунок 2.4 – Ескіз моделі

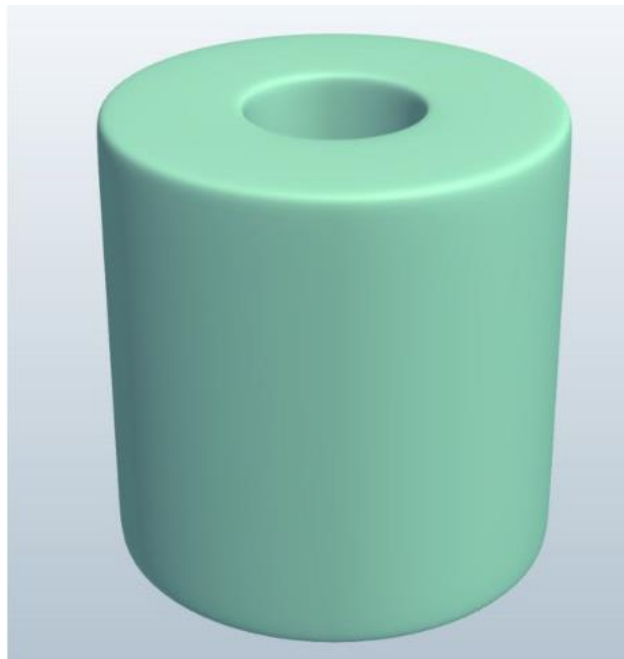


Рисунок 2.5 – Твердотільна модель досліджуваного об'єкта

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  | 22   |

КМ 02.00.00.00 ПЗ



- Фізико-математична постановка задачі: вибір моделі для внутрішніх точок розрахункової області (завдання конкретного виду рівняння, значень коефіцієнтів), а також завдання на границях розрахункової області граничних умов, а для нестационарних задач — початкових умов.
- Введення параметрів розрахункової сітки та чисельного методу для чисельного розв'язання задачі.

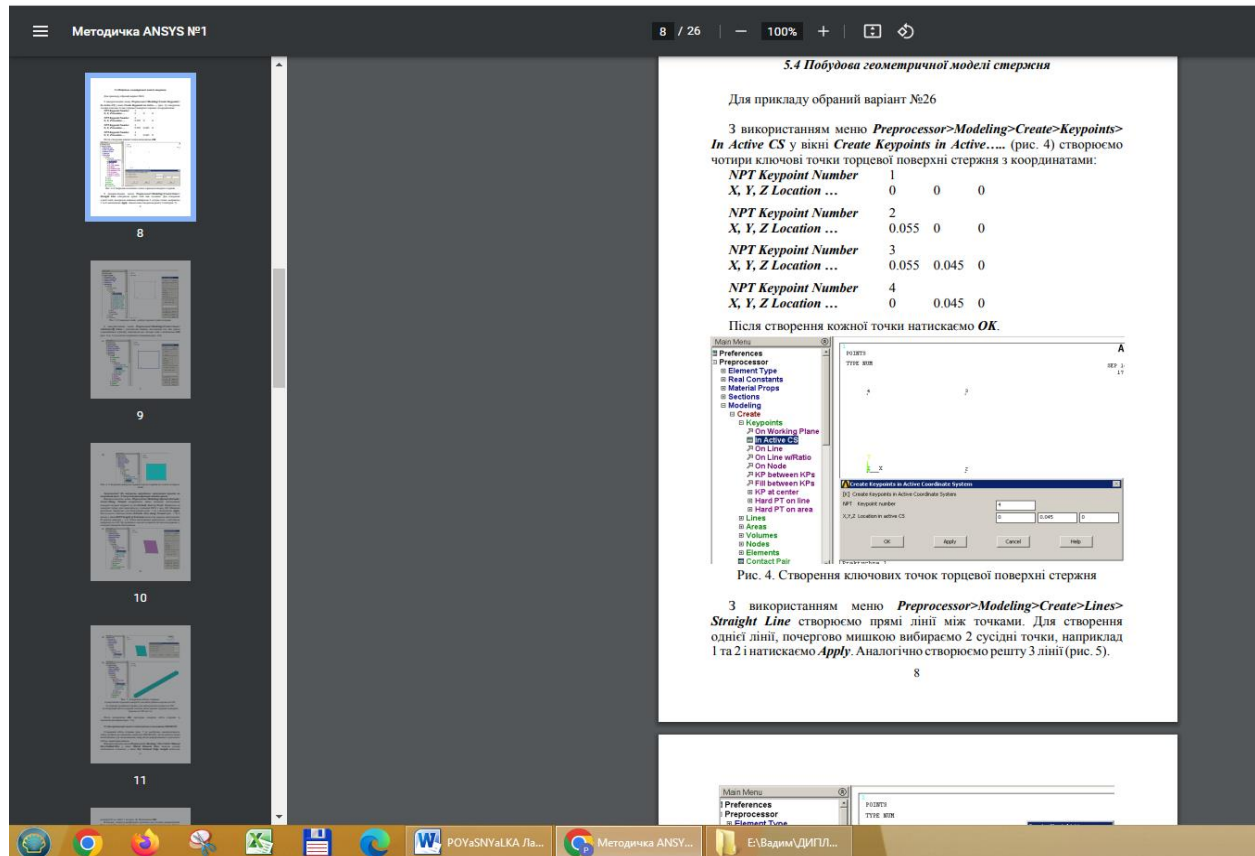


Рисунок 2.7 – Дерево препроцесора

Дерево препроцесора містить вузли з назвами типу «Подобласть#1», відповідні подобластям розрахункової області. При цьому якщо область просторово неодносвязна, то число їх більше 1. Також в дереві препроцесора є вузли «Початкова сітка» і «Загальні параметри», які служать передусім для введення параметрів чисельного розрахунку. У кожній подобласті допускається завдання своєї моделі (див. нижче): наприклад, ламінарна течія нестисливої і нестисливої рідини, турбулентний, багатофазне течії і т. д. У свою чергу сайт

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | 24   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |      |

КМ 02.00.00.00 ПЗ





ході розрахунку течій газів і рідин насамперед нас цікавить побудова геометрії самого обсягу рідини або газу, а не тіла, яке обтікає потік. В результаті багатьох завдань, де предметом інтересу є тільки розрахунок витрати (без урахування процесів, що відбуваються в самому твердому тілі), геометрією сітками є обсяг рідини, в даному випадку тверде тіло представляється як "порожнину" цього об'єму рідини. Побудова моделі починається з вибору площини XY у дереві побудови, а потім натискання кнопки "створити ескіз" на панелі інструментів. Щоб намалювати ескіз перетину труби, використовуйте інструмент "коло". Далі перейдемо на вкладку "розміри" і поставимо діаметр кола 20 мм вниз. Для цього виберіть тип розміру "діаметр".

В результаті всіх операцій Вам необхідно отримати ескіз розрахункової моделі. Щоб побудувати трубу, використовуйте команду розгортки, але для виконання цієї операції потрібно спочатку створити ескіз кривої направляючої.

У дереві побудови виберіть площину ZX і натисніть кнопку "створити ескіз" на панелі інструментів. Щоб намалювати ескіз направляючої, використовуйте інструмент Лінія. Перша горизонтальна лінія (позначається буквою N) під час побудови, а друга вертикальна лінія – позначається буквою V під час побудови. Перейдіть на вкладку розміри і задайте розміри кожної лінії.

Для цього виберіть тип розміру "довжина/відстань". В результаті всіх маніпуляцій необхідно отримати ескіз поперечного перерізу. Основними параметрами команди є: профіль-базовий ескіз для створення обсягу. Ескіз направляючої кривої контуру. Вирівнювання – як вирівняти контур базового ескізу по направляючій кривій. За замовчуванням він заданий як дотична до траєкторії-контур зберігає свою первісну орієнтацію щодо направляючої кривої. Значення глобальної осі зберігає орієнтацію контуру щодо осей. Масштаб-це коефіцієнт масштабування. Специфікація повороту-це параметр, який дозволяє задавати параметр під час обертання контуру базового ескізу навколо кривої направляючої.

За умовчуванням відключений (No Twist) і може приймати значення Turns – у цьому випадку задається число обертів навколо прямої кривої – і Pitch –

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | KM 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 26   |

задається довжина шляху, що проходить контур при повороті. Значення  $TarnsiPitch$  можуть бути негативними – це означає Обертання за годинниковою стрілкою. Зверніть увагу, що контури на прямі криві повинні бути різних ескізах. Основний ескіз може включати кілька контурів (включаючи відкриті) та окремі точки. Напрямна крива може бути замкнутою, але вона повинна бути єдиним контуром в ескізі. Встановіть ескіз, який відповідає перерізу та напрямній, а потім натисніть значок, щоб створити тверде тіло. Результатом буде тверде тіло. Далі збережіть проект і відкрийте Ansys Design Modeler.

2. Сітка. Побудуємо сітку, використовуючи параметри, показані на малюнку 2.9..

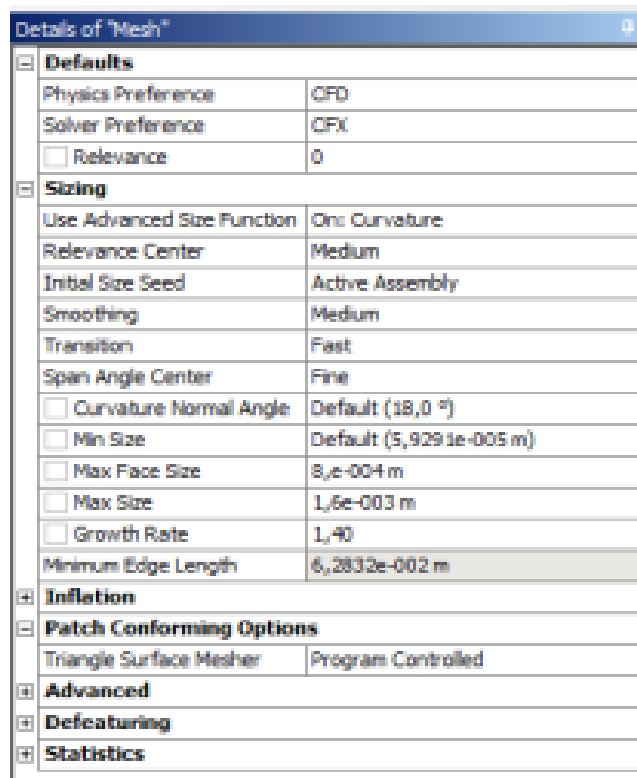


Рисунок 2.9 – Параметри сітки

Щоб переглянути сітку поверхні, запустіть команду попередній перегляд сітки поверхні з контекстного меню групи Сітки перед початком розрахунку. У задачі гідрогазодинаміки через наявність рикордонних шарів і особливостей гідродинаміки в них необхідно шліфувати сітку поблизу суцільної стінки. Для цього виконайте наступні дії: натисніть кнопку надування навкладці сітка.

Після створення призматичного шару біля стіни вставки його в деревосітку з'явиться вікно, в якому вам потрібно ввести параметри призматичного шару. Навкладці геометрія виберіть корпус сопла, а на вкладці кордону виберіть поверхню, яка буде стикатися з суцільною стінкою. У цьому випадку метод побудови вибирається на основі початкового співвідношення сторін, щоб забезпечити нормальну якість структури сітки. Кількість шарів дорівнює 12, а потовщення здійснюється з коефіцієнтом 1,4. Давай створимо сітку із заданими параметрами, а потім подивимося на якість створеної сітки. Для цього в налаштуваннях сітки в розділі Статистика в пункті Метрика сітки виберіть параметр якість. Закрийте редактор сітки та перейдіть до наступного кроку налаштування у вікні Workbench.

Встановлюючи всі елементи моделі показані тут у вигляді дерева (outlinetree). Нові об'єкти можуть бути додані до outlinetree за допомогою PCM dandy. Вікно повідомлень (внизу праворуч) використовується для відображення попереджень та помилок. При запуску CFX-Pre з усіх об'єктів тривимірної сітки автоматично створюється домен з ім'ям Default Domain. З усіх 2D-областей автоматично створюється межа для кожного домену з ім'ям Default Domain за замовчуванням. Ви можете змінити назву, натиснувши відповідне меню перейменування. Панель домену складається з 3 вкладок: Основні налаштування, модель рідина та ініціалізація. Вкладка Основні налаштування - виберіть вод як матеріал уводі.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 28   |



**Results.** CFD-Post, має зовнішній вигляд аналогічний CFX-Pre. Є два вікна з лівої сторони: Selector Window й Details Window. Об'єкти для кожної граничної умови створюються автоматично. Об'єкти редагується подвійним щигликом на значку. Прапорці поруч із кожним об'єктом включають або виключають видимість у вікні перегляду. Вибираємо площини візуалізації параметра течії, наприклад, поля швидкості, ліній струму, поля векторів швидкості. У калькуляторі Function Calculator розраховуємо інтегральні параметри повного тиску, статичного тиску, швидкості, питомої маси в перетинах входу, виходу. Щоб порахувати Pinlet необхідно перейти у вкладку Calculators, потім натиснути FunctionCalculator, потім у вкладці Function вибрати areaAve (середнє за площею); у вкладці Location вибрати Inlet; у вкладці Variable – Pressure; потім натиснути Calculate

## Висновки за розділом 2

У цьому розділі описуються методи чисельного та експериментального дослідження ежектора.

Аналізуються існуючі проблеми при моделюванні двофазних середовищ.

Дізнайтеся, як адаптувати програмний пакет ANSYS до вирішення вашого завдання.

Описується конструкція і принцип роботи експериментальної установки

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  | 30   |

КМ 02.00.00.00 ПЗ

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Дослідження циліндричного сопла

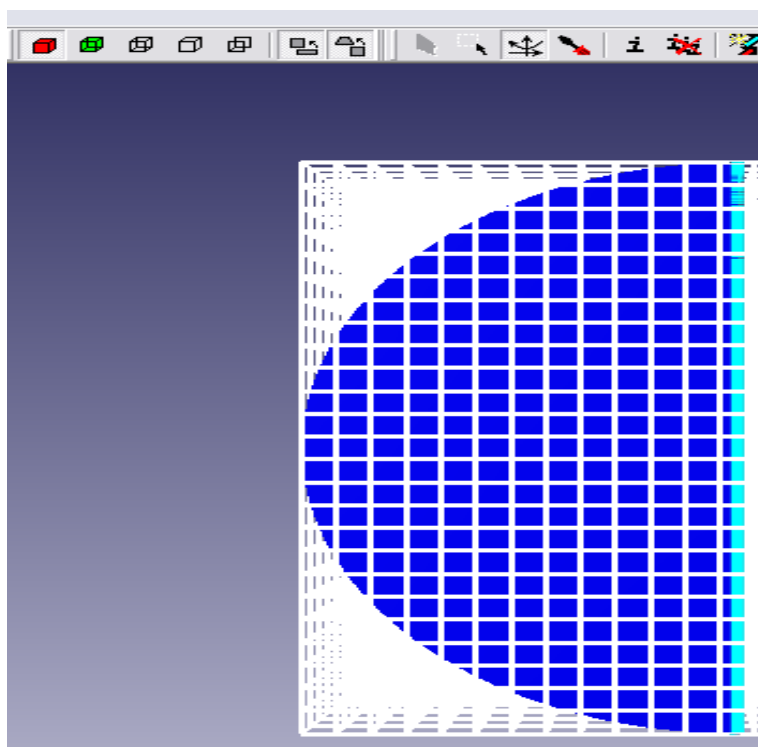
З використанням програмного пакету Ansys була проведена серія чисельних досліджень проточної частини циліндричного сопла діаметром  $D$  і довжиною  $l$ .

З метою встановлення характеристик течії двофазних середовищ було досліджено звичайне циліндричне сопло і знайдено резерви підвищення його ефективності.

На рисунку 3.1 представлена 3D модель проточної частини сопла, нижче розрахункова модель та розрахункова сітка (рисунки 3.2-3.3)

Модель досліджуваної течії – повністю стискаєма рідина з активацією двухфазного середовища (опцією частинки). Абразивні частинки мають діаметри, що коливаються в діапазоні 0,0001–0,001 м.

Число розрахункових ячійок порядку  $N=20000$ , використовувалась неявна схема розрахунку. Перепад тиску  $p_2 / p_1 = 1,98$  що відповідає виходу очисної установки на робочий режим (табл. 3.1).

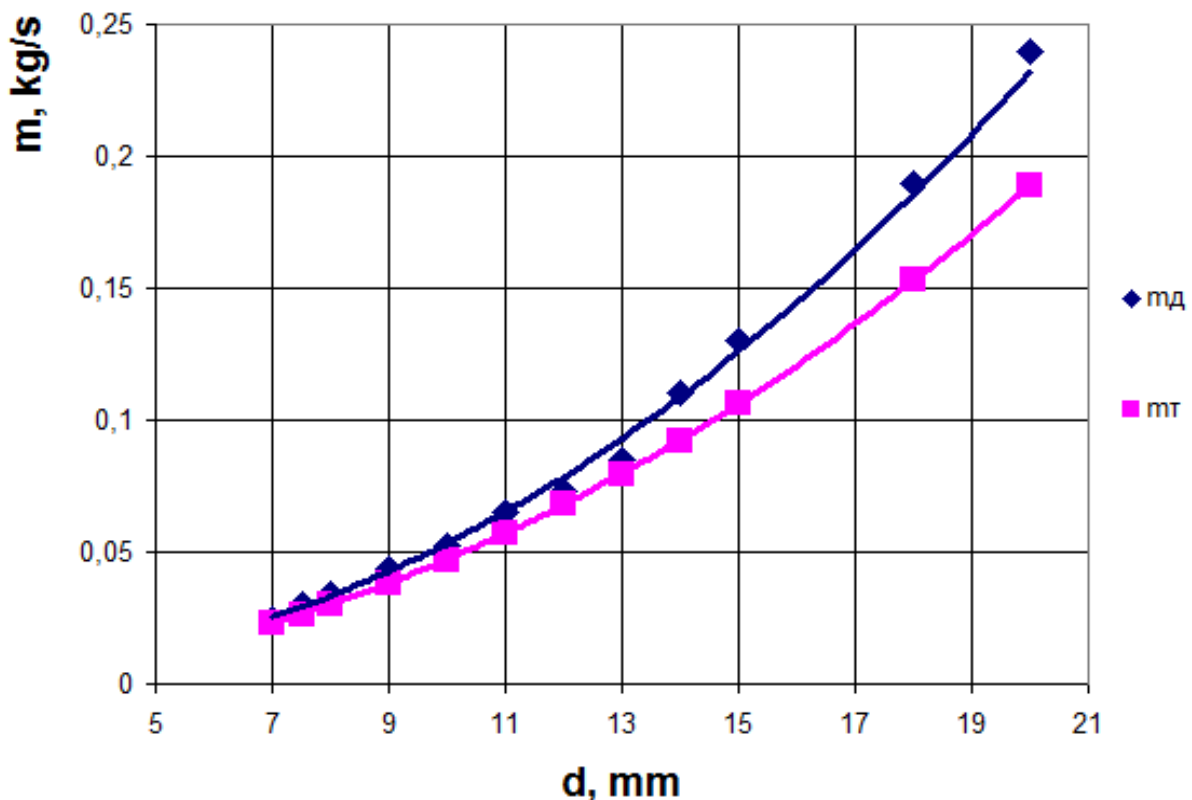


### Рисунок 3.1 Розрахункова сітка

Головним параметром сопла є величина його внутрішнього діаметру  $d$ . Виконана серія чисельних розрахунків для встановлення значимості впливу параметру  $d$  на величину дійсної та теоретичної витрати.

Таблиця 3.1 Геометричні та режимні параметри роботи циліндричного сопла

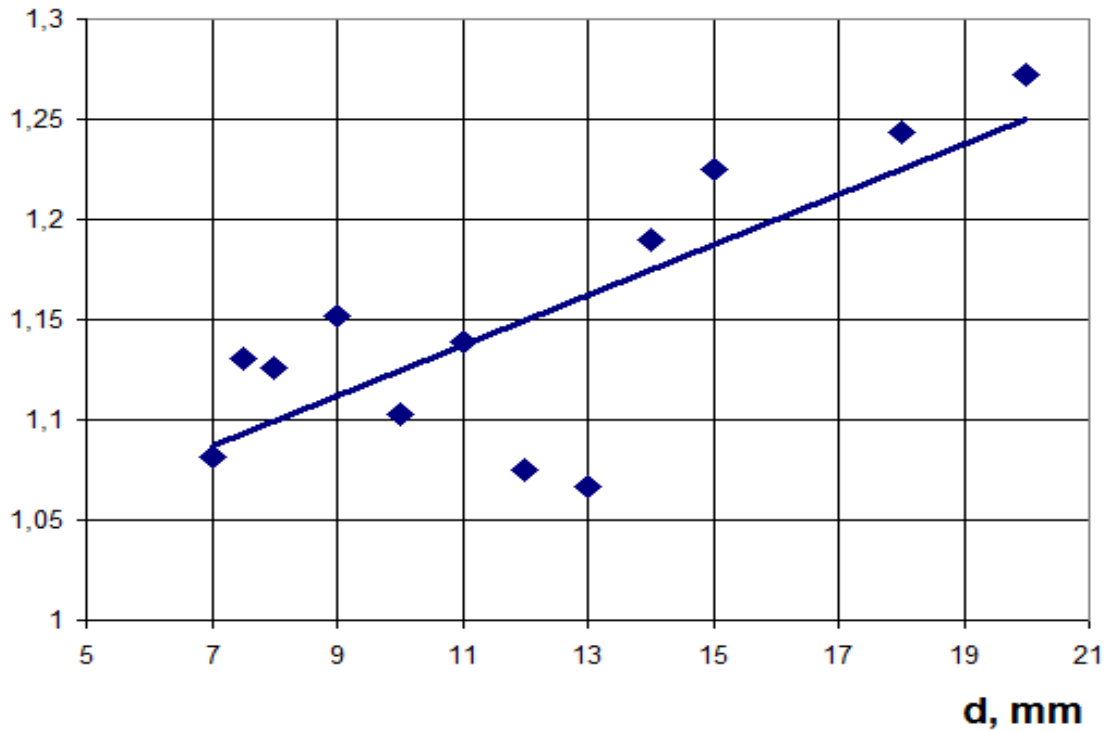
| №  | $r$ , м | $d$ , мм | $l$ , мм | $m_d$ | $\rho$ | $f$ , мм <sup>2</sup> | $p_1$ , Па | $p_2$ , Па | $\mu$    | $m_t$ , кг/с | $C_2$ , м/с |
|----|---------|----------|----------|-------|--------|-----------------------|------------|------------|----------|--------------|-------------|
| 1  | 0,0035  | 7        | 22       | 0,025 | 2,4    | 0,000038465           | 201000     | 101000     | 1,081738 | 0,023111     | 476         |
| 2  | 0,00375 | 7,5      | 22       | 0,03  | 2,4    | 4,41563E-05           | 201000     | 101000     | 1,130776 | 0,02653      | 479         |
| 3  | 0,004   | 8        | 22       | 0,034 | 2,4    | 0,00005024            | 201000     | 101000     | 1,126359 | 0,030186     | 482         |
| 4  | 0,0045  | 9        | 22       | 0,044 | 2,4    | 0,000063585           | 201000     | 101000     | 1,151717 | 0,038204     | 488         |
| 5  | 0,005   | 10       | 22       | 0,052 | 2,4    | 0,0000785             | 201000     | 101000     | 1,102507 | 0,047165     | 490         |
| 6  | 0,0055  | 11       | 22       | 0,065 | 2,4    | 0,000094985           | 201000     | 101000     | 1,138954 | 0,05707      | 495         |
| 7  | 0,006   | 12       | 22       | 0,073 | 2,4    | 0,00011304            | 201000     | 101000     | 1,074827 | 0,067918     | 500         |
| 8  | 0,0065  | 13       | 22       | 0,085 | 2,4    | 0,000132665           | 201000     | 101000     | 1,066376 | 0,079709     | 504         |
| 9  | 0,007   | 14       | 22       | 0,11  | 2,4    | 0,00015386            | 201000     | 101000     | 1,189911 | 0,092444     | 510         |
| 10 | 0,0075  | 15       | 22       | 0,13  | 2,4    | 0,000176625           | 201000     | 101000     | 1,225008 | 0,106122     | 516         |
| 11 | 0,009   | 18       | 22       | 0,19  | 2,4    | 0,00025434            | 201000     | 101000     | 1,243331 | 0,152815     | 525         |
| 12 | 0,01    | 20       | 22       | 0,24  | 2,4    | 0,000314              | 201000     | 101000     | 1,272123 | 0,188661     | 531         |



а)



$\mu$



б)

Рисунок 3.2 Характеристики сопла

а) масова витрата суміші б) коефіцієнт витрати

З отриманих залежностей (рисунок 3.2, 3.3) очевидна тенденція до збільшення значення коефіцієнта витрати повітряно-абразивної суміші сопла та його витратної швидкості зі збільшенням його внутрішнього діаметру при сталих значеннях вхідних та вихідних параметрів  $p_1$ ,  $p_2$ .

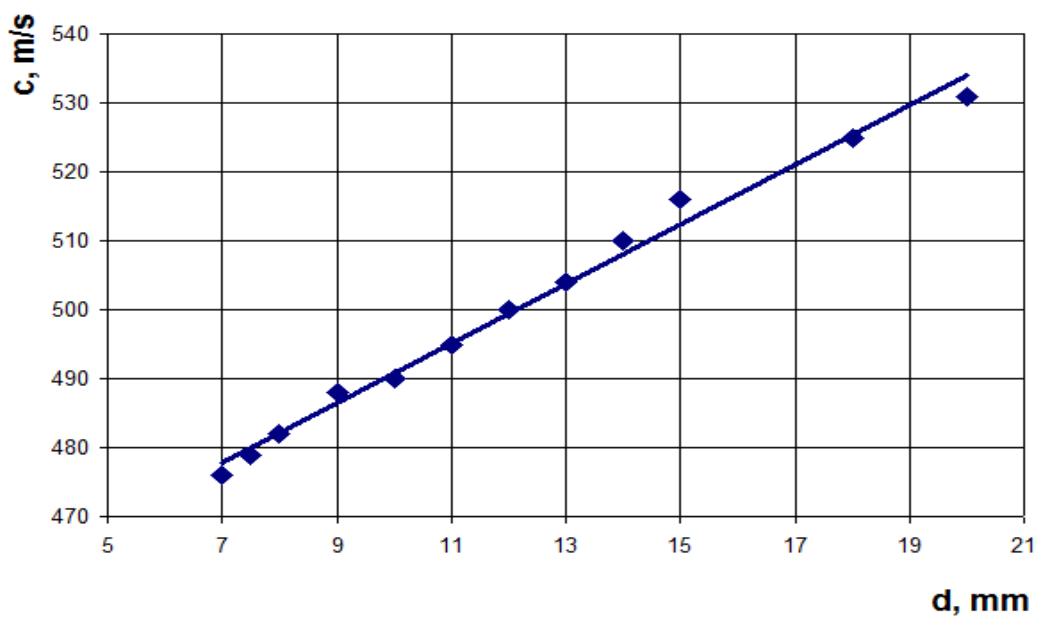
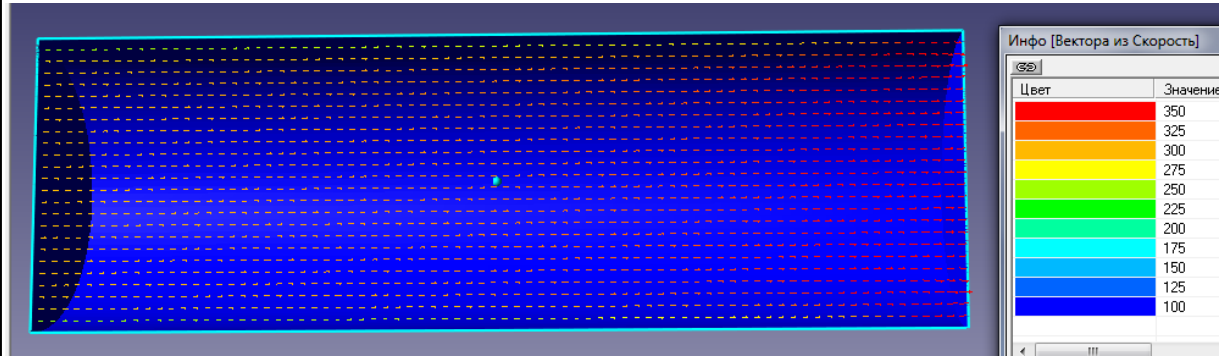


Рисунок 3.3 Вплив діаметра сопла на значення витратної швидкості c

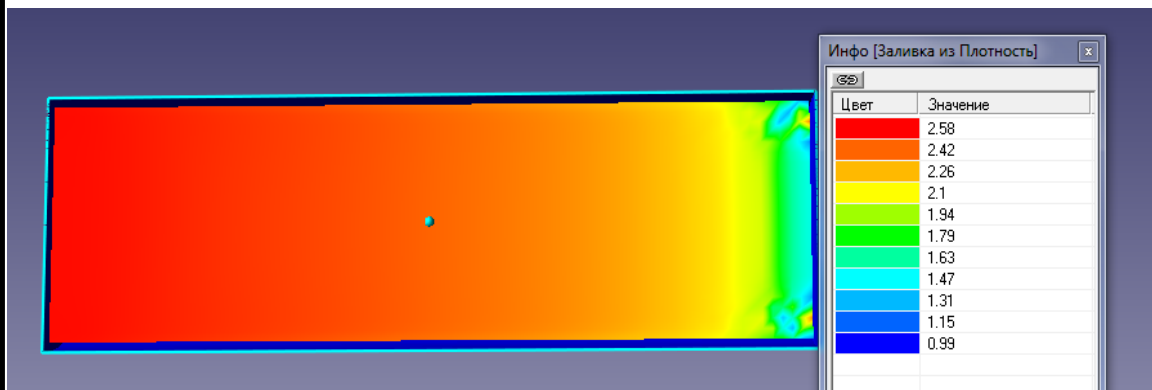
|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 34   |

Слід зауважити, що при збільшенні прохідного перетину сопла в два рази, величина витрачі через нього збільшується в 4.5 рази.

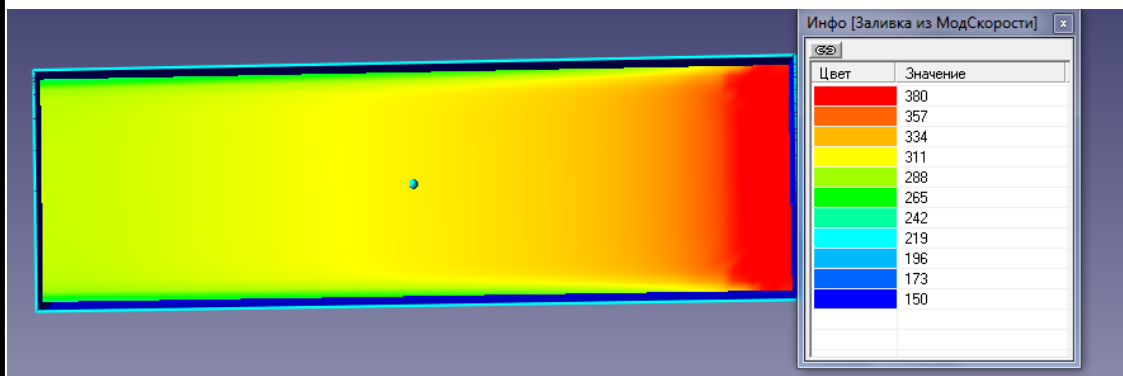
Нижче на рисунку 3.4, 3.5 наведені деякі візуалізації течії



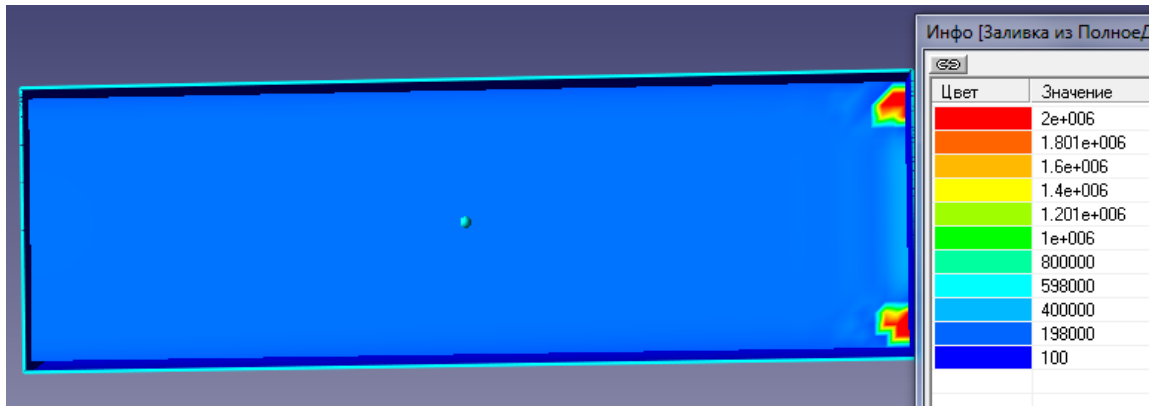
а)



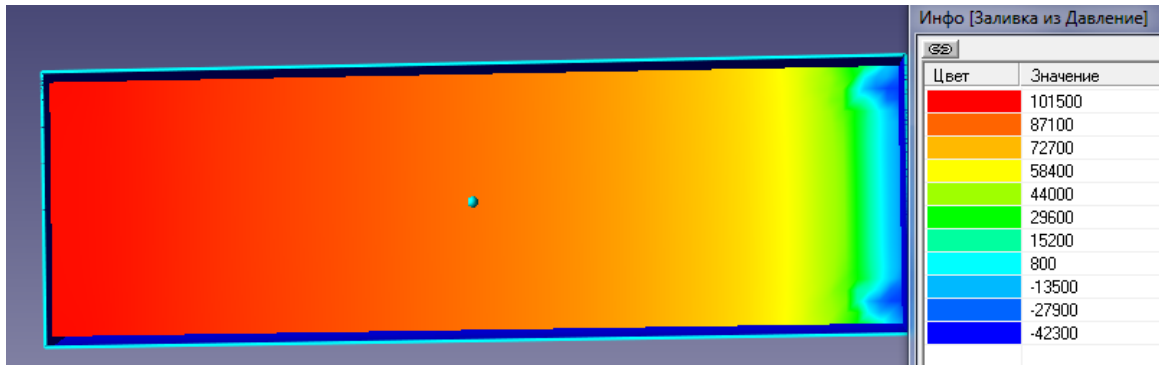
б)



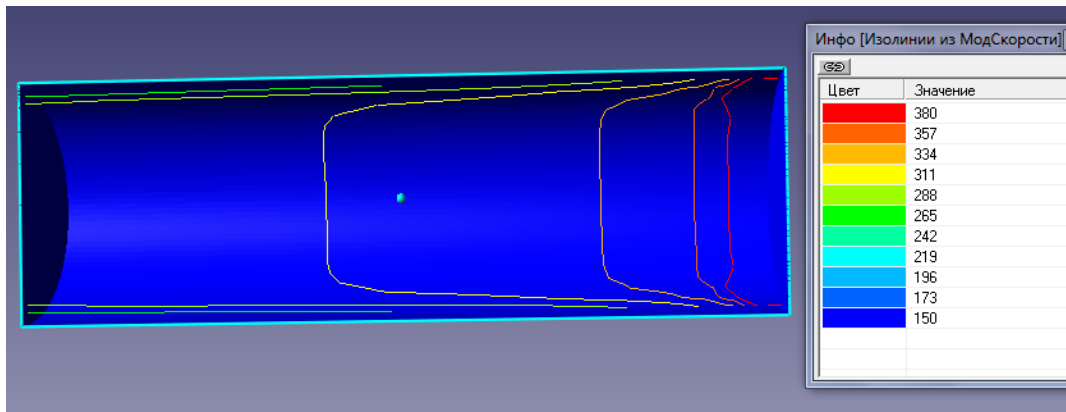
в)



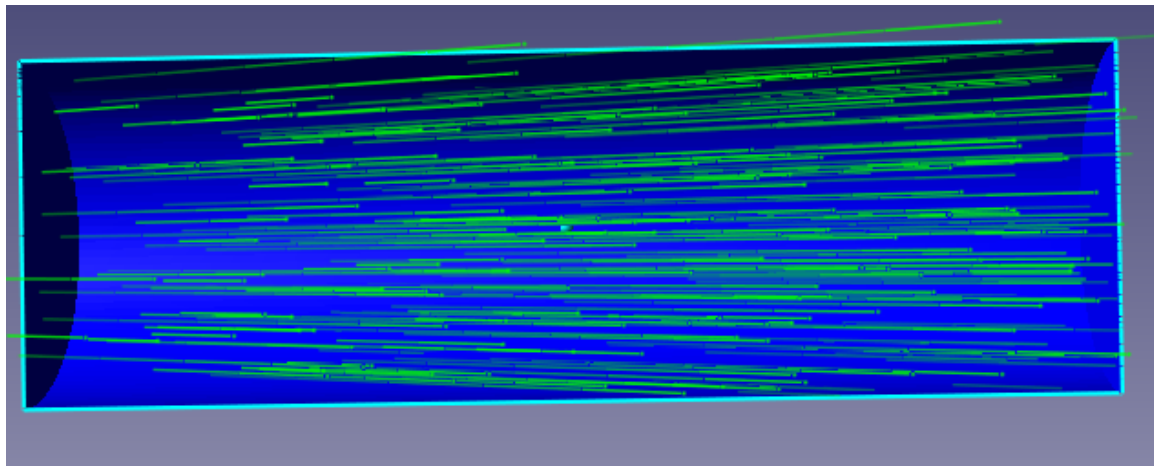
г)



д)



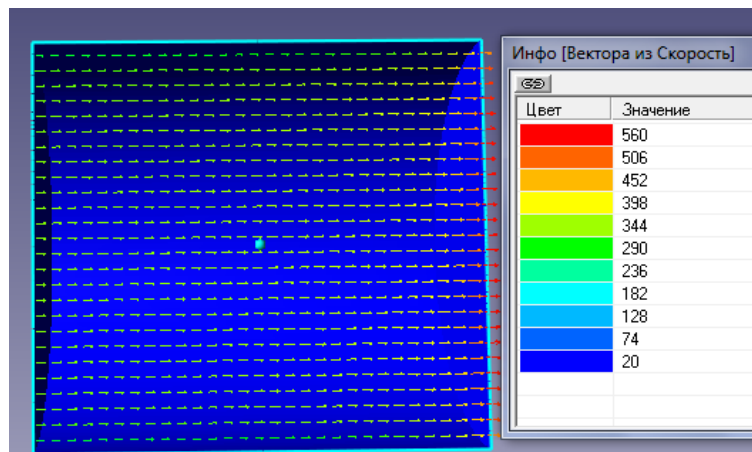
е)



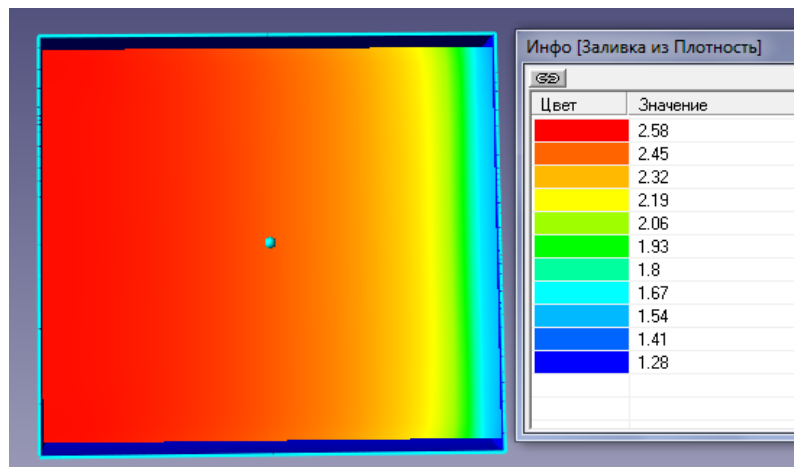
ж)

Рисунок 3.4 – Візуалізації течії ( $d=7\text{мм}$ ,  $l=22\text{мм}$ ,  $p_1/p_2=1,99$ ):

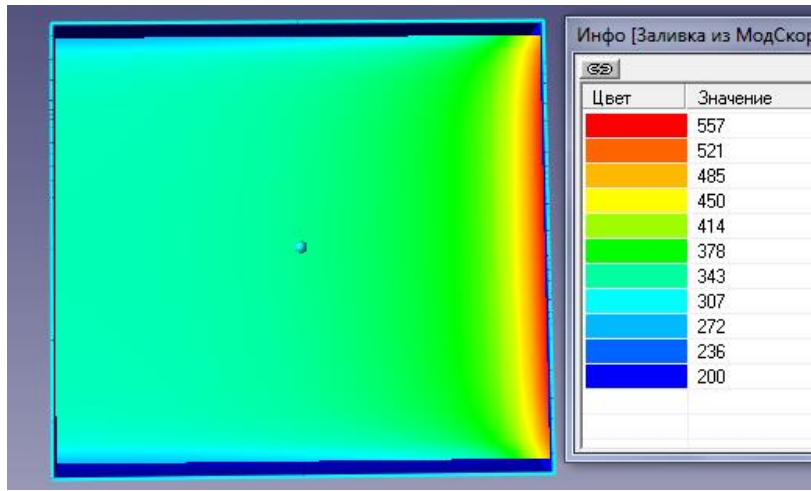
а) вектора із швидкості; б) густина потоку; в) модуль швидкості;  
 г) повний тиск; д) статичний тиск; е) ізолінії з модуля швидкості; ж) спалах швидкості.



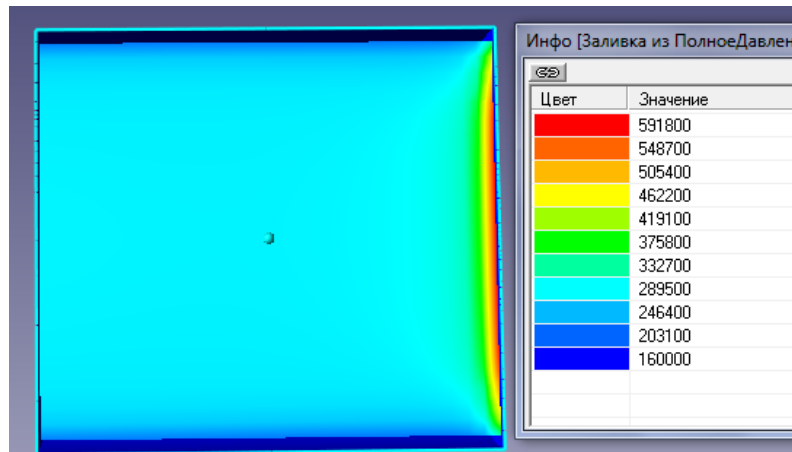
а)



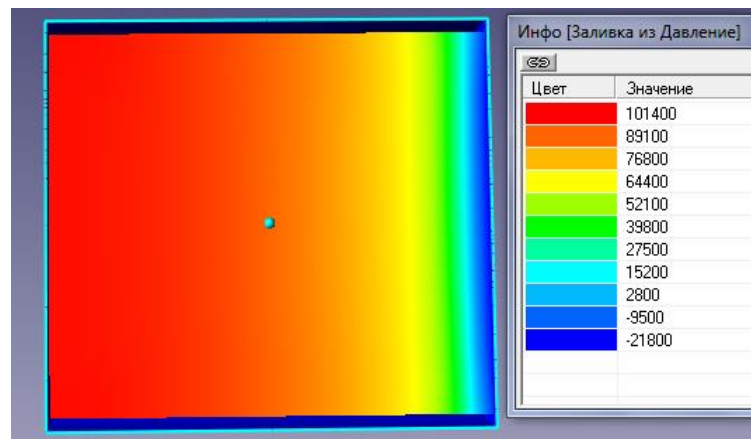
б)



в)



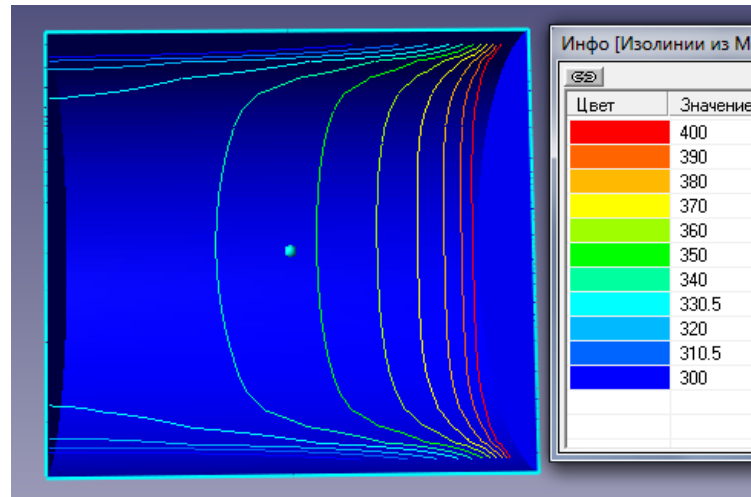
г)



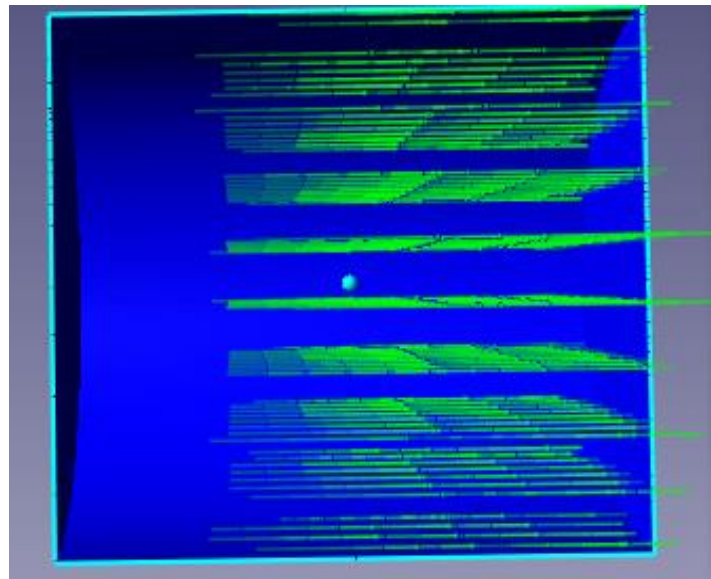
д)

|      |      |          |         |      |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |

КМ 02.00.00.00 ПЗ



е)



ж)

Рисунок 3.5 – Візуалізації течії ( $d=20\text{мм}$ ,  $l=22\text{мм}$ ,  $p1/p2=1,99$ ):

а) вектора із швидкості; б) густина потоку; в) модуль швидкості;  
 г) повний тиск; д) статичний тиск; е) ізолінії з модуля швидкості; ж) спалах швидкості.

Звертаємо увагу на різницю в структурі робочого потоку форсунок з різними значеннями

внутрішнього діаметра  $d_{\text{ад}}=7\text{мм}$  і  $d_{\text{ид}}=20\text{мм}$ . А  $d_{\text{д}}=7\text{мм}$ , спостерігається явна нерівномірність параметрів потоку на виході з форсунки, яка відсутня на малюнку 3.5 через збільшення прохідного перетину  $D$ . Візуалізація потоку показує різке збільшення параметрів потоку на першому перетині сопел. Цього явища не виникає, коли впливає однофазне середовище. На

(рисунок 3.4, б-д) перед вихідним перетином сопла бачимо запірання частини течії, яке виражається у формі двох локалізованих

осередків підвищення робочих параметрів течії, які зникають зі збільшенням параметру  $d$ .

### 3.2 Вибір оптимальної геометрії

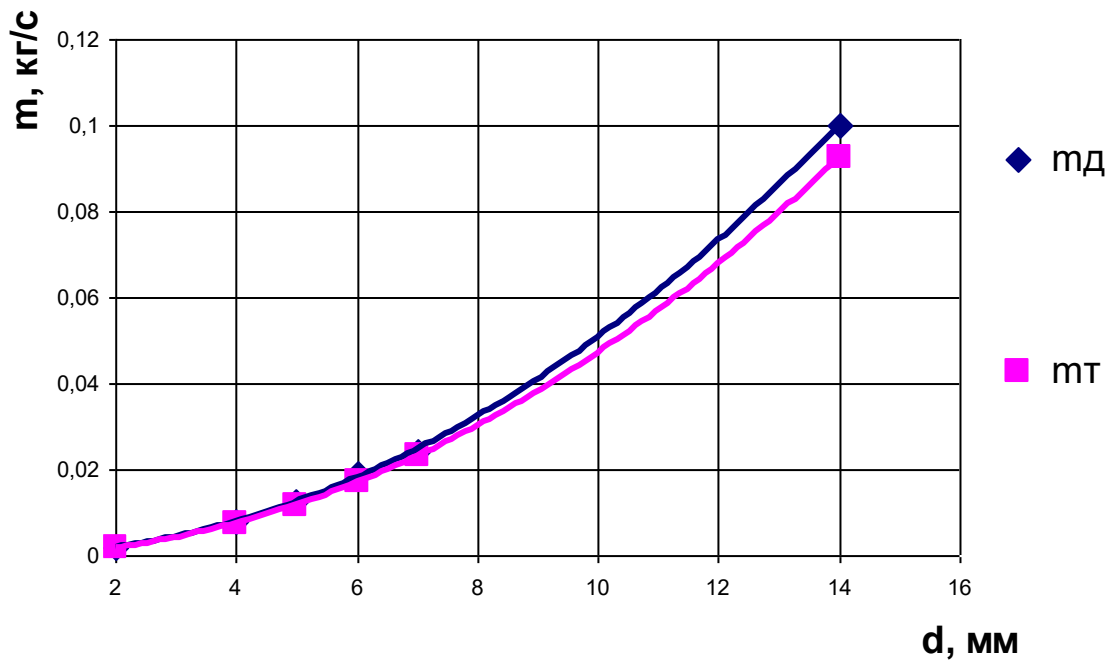
З урахування особливостей течії повітряно-абразивної суміші в соплах різних геометричних форм була проведена серія додаткових чисельних досліджень циліндричного сопла з метою визначення більш раціональної конструкції сопла (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 Геометричні та режимні параметри роботи досліджуваних сопел

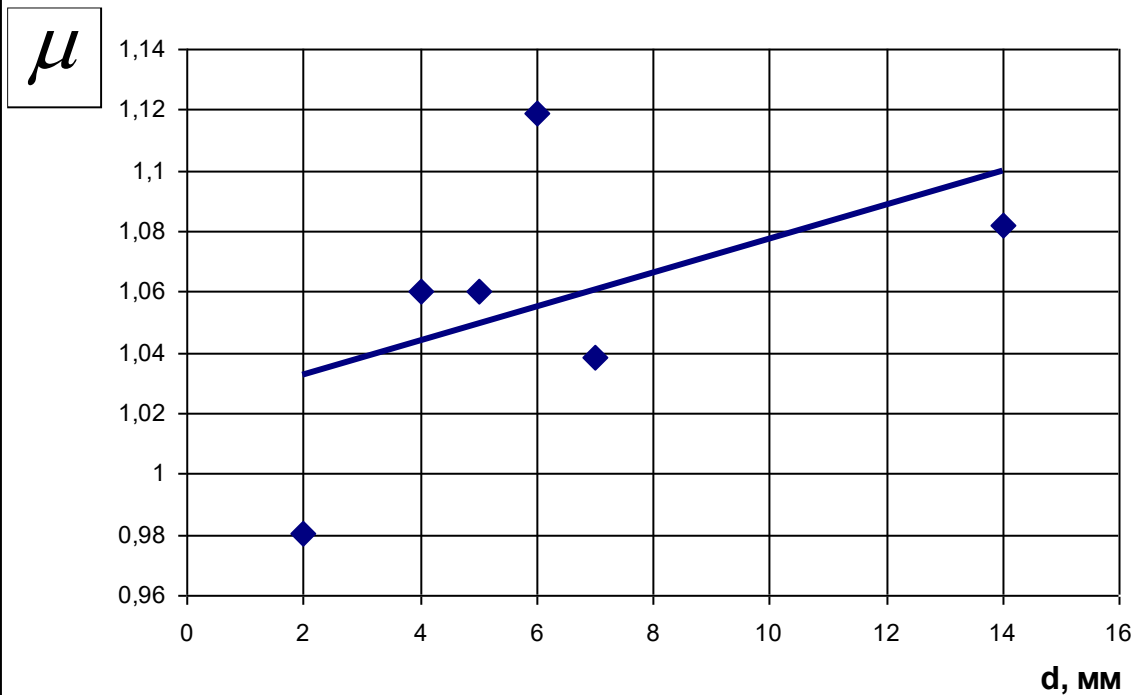
| №        | $g$ , м       | $d$ , мм | $l$ , мм  | $m_d$          | $m_T$           | $c_{вх}$ , М/с | $c_{вих}$ , М/с | $\mu$           |
|----------|---------------|----------|-----------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 1        | 0,0035        | 7        | 44        | 0,02400        | 0,023111        | 288            | 453             | 1,038468        |
| 2        | 0,0070        | 14       | 44        | 0,10000        | 0,092444        | 270            | 481             | 1,081738        |
| <b>3</b> | <b>0,0035</b> | <b>7</b> | <b>4</b>  | <b>0,04400</b> | <b>0,023111</b> | <b>523</b>     | <b>794</b>      | <b>1,903858</b> |
| 4        | 0,0030        | 6        | 22        | 0,01900        | 0,016979        | 262            | 470             | 1,118997        |
| 5        | 0,0025        | 5        | 22        | 0,01250        | 0,011791        | 279            | 463             | 1,060103        |
| 6        | 0,0020        | 4        | 22        | 0,00800        | 0,007546        | 273            | 457             | 1,060103        |
| 7        | 0,0010        | 2        | 22        | 0,00185        | 0,001887        | 244            | 466             | 0,980595        |
| <b>8</b> | <b>0,0035</b> | <b>7</b> | <b>44</b> | <b>0,05250</b> | <b>0,023111</b> | <b>637</b>     | <b>813</b>      | <b>2,271741</b> |

З таблиці 3.2 видно тенденцію до збільшення значення коефіцієнта витрати сопла зі збільшенням його внутрішнього діаметру. Середнє значення коефіцієнта  $\mu$  знаходиться біля 1. Вар. 8 має вставку з пористою структурою та є найкращим.

Звертає на себе увагу вар. 3 з таблиці 3.2. Суттєве зменшення довжини сопла (до 4 мм) призвело до підвищення швидкості більше ніж вдвічі, що в свою чергу призвело до збільшення значень масової витрати суміші та коефіцієнта витрати сопла. Це призвело до підвищення ефективності роботи ежекторно-очисної установки, а саме час обробки квадратного метра металу зменшився в 4,5 рази і складає 2 хвилини.



а)



б)

Рисунок 3.6 Результати чисельного дослідження сопел

а) масова витрата робочого середовища;

б) коефіцієнт витрати.

В якості прикладу був виконаний розрахунок кінчного сопла при рівних умовах з геометрією, що відповідає рисунку 3.7.

| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |
|------|------|----------|---------|------|
|      |      |          |         |      |

КМ 02.00.00.00 ПЗ

Лист

40



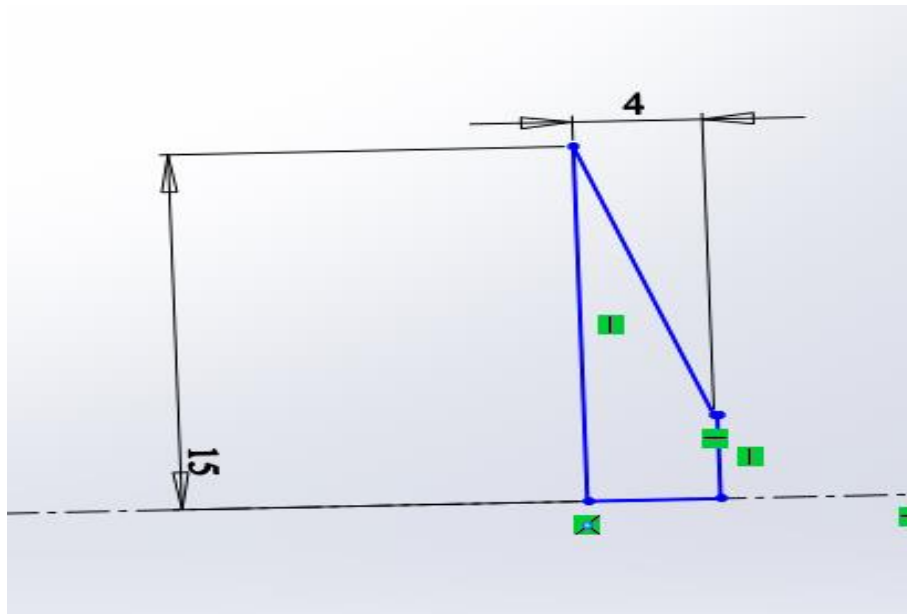
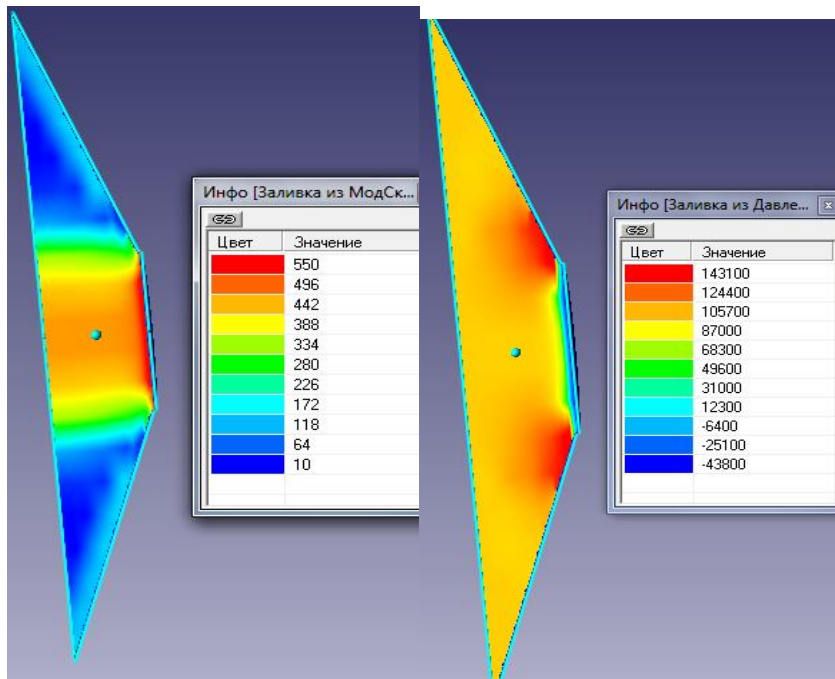


Рисунок 3.7 Ескіз конічного сопла

На рисунку 3.8 наведені деякі візуалізації отримані в результаті чисельного розрахунку, з яких видно існування зворотнього потоку від вихідного перетину сопла до вхідного, що негативно впливає на його ефективність. Через невелику довжину сопла ( $l=4\text{мм}$ ) коефіцієнт його витрати  $\mu=1,57$ . Експериментально підтверджена ефективність данної конструкції, час обробки деталей суттєво скоротився.





потіка абразивного повітря від внутрішньої робочої поверхні сопла, щоб зменшити контакт абразивом. Це призводить до зміни умов зносу і забезпечує значне зниження зносу робочої поверхні сопла. В результаті це збільшує термін служби і забезпечує відносно низьку вартість.

Таблиця 3.3. Кількісні характеристики технічних параметрів абразивної обробки були отримані експериментальним шляхом при використанні конічного сопла з певним перетином потоку.

| Діаметр сопла,<br>мм | Тиск перед соплом, МПа |      |      |      |
|----------------------|------------------------|------|------|------|
|                      | 0,11                   | 0,25 | 0,54 | 0,41 |
| 3                    | 0,21                   | 0,27 | 0,3  | 0,36 |
|                      | 24                     | 30   | 37   | 43   |
| 4,5                  | 0,45                   | 0,6  | 0,71 | 0,82 |
|                      | 57                     | 71   | 83   | 95   |
| 6                    | 0,93                   | 1,13 | 1,29 | 1,49 |
|                      | 98                     | 124  | 150  | 177  |

Необхідно визначити витрату повітря, яка виникає при проходженні потоку через проникний елемент з пористістю, яку ми прийняли за найбільш раціональну. Тобто пористий проникний елемент з пористістю 50% виготовлений з пресованої металеві струшки з діапазоном щілин між витками від 0,5 мм до 1 мм. Для цього скористаємося способом розрахунку [82] об'єму  $V$  витоку стисненого повітря з повітряного ресивера за визначений проміжок часу  $t$  за формулою:

$$Q = \frac{V_{\text{рес}} \cdot (p_{\text{поч}} - p_{\text{кінц}})}{t}, \quad (3.1)$$

де  $Q$  - об'єм витоку (витрата), м<sup>3</sup>/с;

рес.  $V$  - місткість ресивера, м<sup>3</sup>;

поч.  $p$  - тиск повітря в ресивері на час початку виміру, кгс/см. кв.;

кінц.  $p$  - тиск повітря в ресивері на час закінчення виміру, кгс/см. кв.;

$t$  - тривалість періоду виміру, с.

Нам відомо об'єм ресивера, який рівний 0,27 м<sup>3</sup>, тиск повітря в ресивері 6 кгс/см. кв, довжиною повітропроводів можна знехтувати оскільки вони є

короткими, а втрати тиску в них практично відсутні.

Для проведення даного дослідження потрібно пропускати повітря через пористий елемент, з характеристиками описаними вище, який знаходиться в установці для визначення перепаду тиску при повністю відкритому крані. Тобто фіксуємо час  $t$  при якому тиск повітря початковий поч.  $p$  впаде до тиску кінц.  $p$ . Для отримання більш достовірної залежності різницю між поч і  $p$ . та кінц і  $p$ . приймемо крок заміру з дискретністю рівною 0,2 кгс/см. кв.

Всі виміряні та розраховані дані зведемо в табл. 3.4

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
|      |      |          |         |      |                   | 44   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   |      |



Враховуючи отримані дані побудуємо графічну залежність (рисунок 3.10).

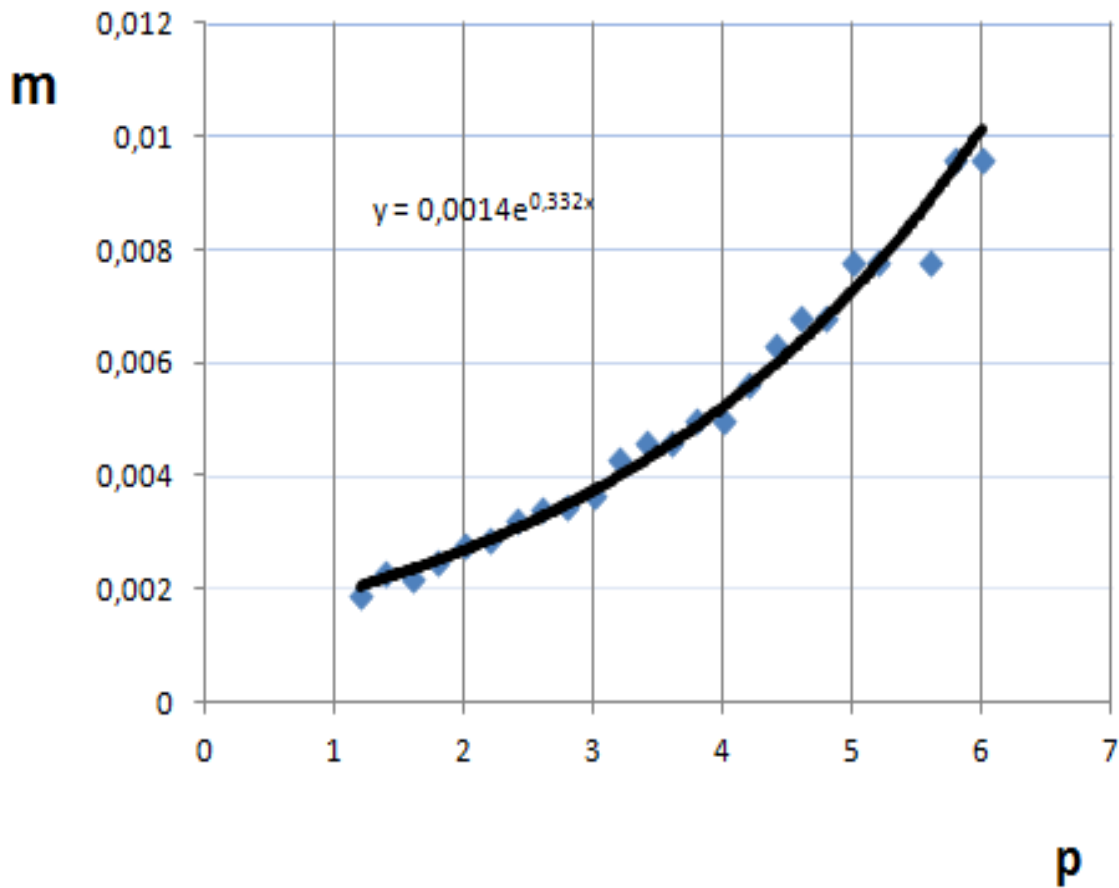


Рисунок 3.10. Залежність витрати стисненого повітря від його тиску в ресивері

Апроксимуючи отримані точки на графіку в плавну лінію бачимо, що дана лінія є експоненціальною.

Залежність витрати повітря при його тиску

$$y = 0,0014e^{0,332x}$$

Усі роботи стосовно визначення перепаду тиску та обчислення витрати повітря були проведені для того, щоб описати властивості пористого проникного елемента в подальших автоматизованих розрахунках з пошуку умов при яких в проектуваному збірному соплі буде утворюватися повітряний прошарок.

### Висновки за розділом 3

1. Чисельно експериментально досліджено процес обробки повітряно-абразивної суміші в робочій насадці.

1. При збільшенні прохідного перетину насадки в 2 рази витрата через насадку збільшується в 4,5 рази.

2. Встановлено відмінності в структурі робочого потоку в форсунках з різними значеннями внутрішнього діаметра  $d=7$  мм і  $D=20$  мм. При  $d=7$  мм спостерігається явна нерівномірність параметрів потоку на виході з сопла, але цього не відбувається при збільшенні параметра  $d$ .

3. Виявляється, якщо скоротити довжину насадки (до 4 мм), швидкість збільшується більше ніж удвічі. Це створило умови для зниження вартості насадки і її ефективності.

4. Експериментально підтверджена ефективність конічної насадки в двічі скорочує час обробки деталей, в яких вона використовується.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | KM 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 47   |

## 4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

### 4.1 Небезпечні та шкідливі фактори компресорного виробництва

На багатьох фабриках виробництво пов'язане з постійним впливом на працівників несприятливих умов. Шкідливі і небезпечні виробничі фактори тісно взаємопов'язані. ВПФ-це фактор, який призводить до погіршення його здоров'я або травм в результаті тривалого або короткочасного впливу на людину. На виробництвах з такими умовами праці часто відбуваються різні нещасні випадки.

ВПФ-це фактор, який впливає на працівника, знижує його працездатність або призводить до різних захворювань, частота яких званою професійними хворобами. Варто відзначити, що межі між цими 2 групами факторів досить умовні. За певних умов шкідливі виробничі фактори можуть стати небезпечними. Наприклад, підвищена вологість відноситься до несприятливих умов праці і може викликати різні захворювання дихальної системи. Якщо людині потрібно боротися зі струмом в такому стані, це буде занадто небезпечно, а нешкідливо.

Можна відзначити, що чітких меж між шкідливими і небезпечними факторами немає, вони завжди умовні і можуть бути зніщені в будь-який момент.

#### Джерела шкідливих хімічних факторів

На виробництві завжди є технічний процес обладнання, яке є джерелом викиду Впф. у цих галузях промисловості, :

Очищення деталей з використанням хімікатів.

Фарбування обладнання.

Зварювальні роботи.

Процес нанесення захисного антикорозійного покриття.

Обробка металів.

При здійсненні всіх цих процесів викидаються шкідливі речовини миттєво, але, як правило, збільшення їх

|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  |      |
|------|------|----------|---------|------|--|--|--|--|--|------|
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | Лист |
|      |      |          |         |      |  |  |  |  |  | 48   |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |  |  |  |  |  |      |

КМ 02.00.00.00 ПЗ



утворення відбувається через недотримання технології або неправильного їх використання.

Фізичні фактори

У багатьох галузях промисловості просто неможливо уникнути

впливу певних факторів. Серед них особливе місце займають:

Температура, підвищена вологість і радіація.

Електромагнітне поле.

Лазерне та ультразвукове випромінювання.

Вібрація.

Сильний шум.

Освітлення може

бути занадто сильним або недостатньою інтенсивністю і однаково шкідливим для зору.

Вплив пилу та аерозолів.

Заряджене повітря.

Робоча частина пристрою.

Кожен фактор, мабуть, не представляє особливої небезпеки для здоров'я людини при короткочасному впливі.

Але в багатьох випадках вплив стає дуже помітним, оскільки співробітники знаходяться в декількох середовищах протягом тривалого часу і навіть одночасно.

Всеобладнання для

видалення масла і води, що згущуються в повітроводі, має регулярно перевірятися обслуговуючим персоналом. У разі замерзання цих пристроїв їх можна нагрівати гарячою водою, парою або гарячим повітрям. Забороняється використовувати для цієї мети відкритий вогонь.

Під час роботи компресорної установки необхідно контролювати:

- а) тиск і температуру стисненого газу після кожного ступеня стиснення;
- б) Температуру стисненого газу після Системи охолодження;
- в) безперервну подачу холодної води в компресорі систему охолодження;

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | KM 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Підпись | Дата |                   | 49   |

d) Температура охолоджуючої води, що надходить в систему охолодження виходить з неї по точках;

e) тиск масла і температура системи змащення;

f) Величина струму статора, ав синхронному електроприводі - струм ротора двигуна;

g) правильне дію мастильного матеріалу і рівень масла в ньому; показання приладу з інтервалами, зазначеними в інструкції, повинні бути занесені в журнал експлуатації компресора більше ніж через 2 години.

Повітроводи і газопроводи слід прокладати з ухилом 0,005 в сторону лінійного водоотделителя. Слід виключити утворення застійних зон і ділянок, де можуть накопичуватися конденсат і масло.

На певних ділянках трубопроводу, де можливе скупчення води і масла, для технічного обслуговування доступні лінійні водоотделители з автоматичною або ручною продувкою.

#### 4.3 вібрація

Джерелами вібрації є:

- Незбалансована Обертова маса агрегату;
- Вплив деталей (шестерня, підшипниковий вузол);
- Дефекти і нещільні з'єднання окремих частин машини.

Найбільш небезпечним проявом вібрації є вплив на людину обладнання для технічного обслуговування.

Вплив вібрації на людину-оператора, тобто, в більшості випадків, на людину, що знаходиться поруч з машиною, класифікується наступним чином::

- Відповідно до способу передачі вібрації людині;
- У напрямку впливу вібрації;
- Залежно від тимчасових характеристик вібрації.

Якми повинні враховувати фактори, що впливають на ступінь і характер негативного впливу:

- Ризик виникнення різних патологій аж до професійної вібраційної хвороби;
- Показники фізичної активності і нервово-емоційного стресу;
- Вплив супутніх факторів підсилює вплив вібрації (охолодження, вологість, шум іт. д.);
- Тривалість і періодичність впливу вібрації;
- Тривалість робочої зміни.

Вібрація включена в перелік шкідливих виробничих факторів. Її можна розділити на кілька категорій:

За способом передачі: загальна і місцева.

У напрямку: вертикальна і горизонтальна.

За часом впливу: тимчасова і постійна.

В результаті постійного впливу цього фактора починає страждати не тільки нервова система, але і опорно-руховий апарат і аналізаторна система. Працівники, змушені працювати в такій ситуації, часто скаржаться на головні болі, запаморочення і заковисання.

Додаючи вплив супутніх факторів, таких як вологість, висока температура і шум, це тільки посилює шкідливий вплив вібрації. Щоб запобігти цьому, виможемо запропонувати наступні заходи:

Заміну обладнання на більш технологічне.

Використовуйте м'яке покриття на віброуючій частині пристрою або обладнання.

Установка агрегату на міцному фундаменті.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 51   |

## Монтаж трубопроводів

### Безпека

експлуатації трубопроводу гарантується правильною прокладкою, якісним монтажем, установкою компенсаторів і необхідної арматури, пристроєм опалення та дренажу, контролем технічного стану і своєчасним ремонтом, при необхідності.

Трубопровід слід прокладати з постійним ухилом у бік руху газу для видалення конденсату і нафти, але при цьому слід уникати низьких ділянок аботупиків, де може накопичуватися рідина. Паропроводи і газопроводи, в яких утворюється конденсат, вимагають дренажного обладнання для відведення конденсату.

Прокладка трубопроводів на підприємстві може бути підземною

### Прохідний (тунель)

і безканалу (безпосередньо на землі). Наземна прокладка трубопроводу здійснюється по опорах, а наземна укладання здійснюється по естакаді, стояках, кронштейнів, а також по стовпах, стін будівлі. Трубопровід наземної прокладки кількаріздовий і підземного трубопроводу. Мінімальна висота для прокладки трубопроводу - не менше, а на дорозі - не менше.

### Вплив шкідливих факторів на людину

Будьяке підприємство повинно намагатися забезпечити комфортну обстановку, створити сприятливі умови для своїх співробітників. Це, в першу чергу, стосується чистоти повітря у виробничих приміщеннях. Санітарні служби поділяють основні шкідливі виробничі фактори на хімічні речовини і промисловий пил. Перші, в свою чергу, діляться на:

Часто знаходять застосування на виробництві промислові отрути.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 52   |

Інсектициди для сільського господарства.

Наркотик.

Побутова хімія.

Шкідливі речовини.

Велика кількість пилу також є актуальною проблемою в гірничодобувній промисловості, металургії, машинобудуванні та сільському господарстві. Негативний вплив пилу проявляється в тому, що вона може викликати розвиток захворювань легенів. Набудь-якому підприємстві працівники піддаються впливу шкідливих виробничих факторів відразу з декількох груп-комплексних. Саме тому проблема забезпечення захисту від їх негативно впливуватиме у виробничій сфері дуже гостро.

Захист працівників від небезпечних речовин

Незважаючи на всі заходи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу факторів, досягти ідеальних умов праці неможливо. Цього не допускають особливості технічного процесу, продукції та сировини для її виготовлення. Тому захист від шкідливих факторів у виробництві є першочерговим завданням для керівників. Вам необхідно керуватися наступними пріоритетами:

Усувати небезпечні фактори або знизити ризик їх впливу.

Використовувати безпечні методи роботи.

Боротися з небезпечними факторами їх джерелами.

Ефективно використовувати засоби індивідуального захисту.

Часто буває так, що всі вжиті заходи не можуть гарантувати повністю безпечні умови праці, в цих випадках просто неможливо обійтися без застосування ЗІЗ. Серед них можна виділити наступні категорії, які використовуються найчастіше:

Шумо-заглушувальні навушники. Однак вони знижують здатність людини орієнтуватися у Всесвіті і можуть викликати головні болі через стиснення.

Вібрація може бути викликана рукавицями, подушечками для долонь і рукавичками. Такий захист може знизити ефективність праці в разі незручності роботи, тому необхідно передбачити додаткові перерви.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Підпись | Дата |                   | 53   |

Маскаіпроти газ. Працювати в нїх тривалий час дуже складно і незручно, тому Вам слід пошукати інший засіб захисту.

Можна зробити висновок, що засоби індивідуального захисту, з одного боку, знижують вплив шкідливих факторів, а з іншого - можуть представляти ще одну небезпеку для здоров'я співробітників.

Заходи безпеки спрямовані на те, щоб шкідливі фактори виробництва не чинили небезпечного впливу на людину. Для цього інструкції з техніки безпеки повинні бути обов'язковим в будь-якій галузі. Дата і зміст будуть зафіксовані в спеціальному журналі, підписаному всіма з означеними особами і тими, хто проводить цей інструктаж.

Всього існує кілька видів такої роботи:

**Вступний**  
інструктаж. Це обов'язково робиться з працюючою особою. Вік, трудовий стаж або посада тут не важливі.

**Первинний.** Це в жеробиться на його робочому місці, зазвичай це робить майстер або Керівник даного відділу або майстерні.

**Повторювати.** Він проводиться кожні місяці для всіх співробітників без винятку.

Незапланований буде виконаний, якщо:

Змінилися правила.

Змінився технологічний процес.

Ми купили нове обладнання.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Підпись | Дата |                   | 54   |

## Висновок

1. У дипломному проєкті аналізуються існуючі проблеми при моделюванні двофазного середовища.

2. Описано методологію адаптації задач програмного комплексу Ansys до рішень. У даній статті описується конструкція і принцип роботи експериментальної установки для очищення ежекторів.

3. При стабільних значеннях вхідних і вихідних параметрів  $p_1$ ,  $p_2$  встановлена тенденція до збільшення витрати зі збільшенням значення коефіцієнта витрати повітряно-абразивної суміші форсунки і її внутрішнього діаметра.

4. Встановлено, що якщо прохідний перетин сопла збільшити в 2 рази, то величина витрати через сопло збільшується в 4,5 рази.

5. Було встановлено, що зменшення довжини сопла (до 4 мм) збільшує швидкість більш ніж у двічі й збільшується величина коефіцієнта витрати сопла.

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | KM 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 55   |

## Використана література

1. Increase of efficiency of turbine setting based on study of internal flows  
Bondarenko, G., Vanyeyev, S., Vaga, V., Rodymchenko, T., Bashlak, I.  
Lecture Notes in Mechanical Engineeringthis link is disabled, 2019, страницы 237–246
- 2 .Сичук В.А. Нові принципи конструювання і виготовлення сопел для абразивоструменевих машин / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // "Науковий вісник херсонської державної морської академії" Науковий журнал №1 (6) 2012 – Херсон: ХДМА, 2012. – С. 317-321.
3. Сичук В.А. Практика виготовлення та випробування зносостійкого сопла піскоструменевої машини отриманого методом сухого радіально-ізо статичного пресування / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // "Наукові нотатки" Міжвузівський збірник. Випуск 31 (червень, 2011) – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – С. 350-353.
4. Сичук В.А. Розробка і дослідження нових конструкцій пористих сопел для абразивоструменевих машин / О.В. Заболотний, В.А. Сичук // "Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті" Науковий журнал. Випуск 2 – Луцьк: ЛНТУ, 2014. – С. 43-53.
- 5.Наказ про затвердження правил охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. 10 квітня 2018р. за № 433/31885.
6. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-18#Text>
7. Ansys CFX 10.0 Theory Reference / SAS IP Inc., 2005.\

|      |      |          |         |      |                   |      |
|------|------|----------|---------|------|-------------------|------|
|      |      |          |         |      | КМ 02.00.00.00 ПЗ | Лист |
| Изм. | Лист | № докум. | Подпись | Дата |                   | 56   |