

Міністерство освіти і науки України  
Сумський державний університет  
Центр заочної, дистанційної та вечірньої форм навчання  
Кафедра технічної теплофізики

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

здобувача за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти  
за напрямом підготовки 6.050604 «Енергомашинобудування»  
Спеціальність 6.05060405 «Компресори, пневмоагрегати та  
вакуумна техніка»

на тему «Удосконалення методів розрахунку та  
проєктування робочого сопла ежекторно-очисної  
установки»

## **ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

Завідувач кафедри

С. М. Ванєєв

Керівник роботи

В. М. Бага

Здобувач

В. А. Нестеренко

Група

ХКдн-74др

## Зміст

ВСТУП.....	3
1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ.....	9
2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЖЕКТОРА.....	10
2.1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ.....	10
2.2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ.....	11
2.3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ.....	46
3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	54
4 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	74
ВИСНОВКИ.....	85
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	87

					<i>ХК 06.00.00.00 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>Нестеренко</i>			Підвищення ефективності робочого сопла ежекторно-очисної установки	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Бага В.М.</i>					2	77
<i>Реценз.</i>						<b>ХКдн-74др</b>		
<i>Н. Контр.</i>								
<i>Утверд.</i>		<i>Вансєв С.М.</i>						

## ВСТУП

Сучасне підвищення вимог щодо енергозберігаючих технологій посилює вимоги до якості процесів перетворення енергії в енергетичних установках. Останнім часом на перший план вийшли екологічні норми, умови економічності, компактність та надійність створюваних пристроїв. Характерні типові особливості обмежених закручених течій можуть бути корисні при розробці нових пристроїв. Підвищення якості робочого процесу можливо за рахунок високої інтенсивності турбулентності, наявності рециркуляційних зон, радіального перерозподілу повної ентальпії і інших властивостей закрученого потоку, які можна встановити за результатами проведених досліджень

Ежектор (франц. Éjecteur, від éjecter - викидати) - пристрій, в якому відбувається передача кінетичної енергії від одного середовища, що рухається з більшою швидкістю, до іншої. Передача енергії відбувається в процесі змішування середовищ. Ежектор використовується в струменевих насосах і вакуумних насосах. Широко застосовується в хімічній і нафтопереробній промисловості як змішувач. Розрізняють ежектори низького та високого тиску.

Ежекторне обладнання знайшло широке застосування в ежекційних системах охолодження двигунів, в паротурбінних установках, в кондиціонерах і навіть в простих пульверизаторах та приладах, якими ми користуємося в повсякденному житті.

Ежектори використовуються для вентиляції приміщень, для відкачування гарячих газів, для виведення з численних установок відпрацьованих газів, для всмоктування атмосферного повітря через радіатор, для розпилення масел і мазуту в форсунках. Ежекторні пристрої застосовуються для вентиляції приміщень рухомих об'єктів, якими є вагони поїздів, салони автомобілів, каюти кораблів.

В данній роботі виконано дослідження ежекторно-очисної установки, в якій в якості ежектора використовується піскоструменеве сопло.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Уперше метод піскоструминної обробки запатентований американцем Бенджамином Чу Тилгманом в 1870 р. Відтоді змінилося багато що: був вдосконалений піскоструминний апарат, винайдена піскоструминна камера, модернізовано інше піскоструминне устаткування. Незмінним залишився лише принцип роботи, який полягає в обробці поверхні того або іншого матеріалу піском або іншим абразивним матеріалом.

Піскоструменева чистка використовується для очищення поверхонь різних матеріалів. Причому, тенденція застосування піскоструминних апаратів і піскоструминних камер за останні роки збільшуються. Цьому сприяє поява нових видів абразивів, вдосконалення самих піскоструминних установок, поширення застосування хімічних покриттів перед нанесенням яких оброблювану поверхню потрібно якісно очистити.

Сьогодні піскоструминна обробка використовується для очищення поверхонь металу, не ушкоджуючи структури поверхні. Поява нових матеріалів спричиняє за собою і розширення можливостей піскоструминних робіт.

Необхідність в застосуванні піскоструминної обробки металу обумовлена різними причинами: наявністю на поверхні іржі, вторинної окалини, пригару, залишків формувальної суміші, різних плям, старого покриття і так далі. Перечислимо переваги застосування абразивоструменевої обробки:

1. Глибока піскоструминна обробка металу дозволяє досягти таких результатів, що навіть при шестикратному збільшенні не будуть помітні окалина і ржавчина.

2. Можливість регулювання глибини очистки. Можливо виконати очищення, при якому метал виглядає чистим при поверхневому огляді.

3. Поверхнєве очищення металу. Після неї залишається видні неозброєним оком плями і смуги окалини, але вони займають не більше п'яти відсотків усієї поверхні, що є прийнятним в багатьох випадках.

4. При легкій мірі очищення з металевої поверхні віддаляється іржа і окалина, що відшаровується.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

Піскоструминна обробка металу дозволяє не лише очистити його від фарби, іржі і інших забруднень, але також зробити знежирення поверхні, що особливо важливо перед фарбуванням, гальванотехнічними операціями і газотермічним напиленням.

Процес піскоструминної обробки є зіткненням потоку абразивного матеріалу, що має високу кінетичну енергію, з оброблюваною поверхнею.

Піскоструминна обробка поверхонь застосовується у разі потреби В деяких випадках в процесі піскоструйки спостерігається руйнування частини поверхні, це не страшно, цей факт говорить про те, що на цій ділянці поверхні корозія була занадто глибокою і ця ділянка все одно підлягає ремонту.

Піскоструминній обробці можна піддавати будь-які поверхні: метал, бетон, цегляна кладка, природний камінь, скло, дерево і так далі. Сфера застосування методу піскоструминного очищення досить велика. За допомогою піскоструйки можливе промислове прибирання, очищення фасадів і будівель, автотранспорту, різних ємкостей, промислових і побутових металоконструкцій і споруд, різних механізмів і деталей.

При піскоструйці використовується кварцевий пісок дрібної фракції (0,5-0,1). Залежно від тиску і якості абразиву піскоструминна обробка надає поверхні різну міру шорсткості :

1. Піскоструминна обробка з ефектом, що нагадує очищення металеву щіткою.
2. Звичайне очищення поверхні без ефекту дзеркального блиску.
3. Очищення сталеві поверхні майже до блиску.
4. Очищення металеві поверхні до повного блиску.

Усі сучасні лакофарбні матеріали вимагають обов'язкової піскоструминної обробки поверхні для надання їй шорсткості і зняття забруднень. Піскоструминний спосіб є найбільш ефективним з усіх існуючих способів очищення і підготовки поверхні. В порівнянні із звичайною обробкою шліфувальною машиною швидкість обробки за допомогою піскоструминного устаткування в десятки разів вище.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вимоги до підготовки сталевोї поверхні включають два важливі параметри: профіль поверхні і міра очищення. В результаті досліджень, що проводяться виробниками лакофарбних матеріалів, виявлено, що для гарантованої адгезії і абсолютного захисту субстрату перед нанесенням покриття вимагається забезпечити відповідний профіль. Насічка забезпечує щільне однорідне зчеплення між поверхнею і покриттям. При піскоструминному очищенні непотрібні матеріали віддаляються, поверхня, що очищається, зміцнюється, незграбні частки абразиву надають шорсткість поверхні і створюють профіль або насічку. Процес піскоструминної обробки металевих поверхонь виконує подвійну функцію: він очищає поверхню і надає їй шорсткість. Очищена і шорстка поверхня є бездоганною основою для зчеплення із захисним покриттям. Таким чином, попередня обробка поверхні за допомогою піскоструминного устаткування є економічним методом, що забезпечує необхідну основу ґрунтовки для нанесення покриття. Довговічність і ефективність покриття по сталевих поверхнях значною мірою залежать від підготовки поверхні для нанесення захисного покриття. Піскоструминна обробка поверхні подовжує термін служби покриттів, що наносяться, до 6 разів, що дозволяє значно заощадити на капітальному і поточному ремонті металоконструкцій.

При піскоструменевому чищенні алюмінію, титану, магнію і інших металів видаляють корозію і, залежно від вибраного абразиву і тиску, наносять профіль. Нові, м'якші види абразиву (включаючи пластик і пшеничний крохмаль), а також спеціальне абразивострумінне устаткування з низьким тиском використовуються для сухого способу видалення покриттів з сучасних композиційних матеріалів. Це дозволяє компаніям очищати літаки, вертольоти, автомобілі, вантажівки і човни без використання абразивоструйної обробки, яка може порушити структуру поверхні. Крім того, перехід на сухий спосіб очищення верхніх шарів унеможливорює дію паробочих токсичних хімічних речовин, використовуваних при очищенні, і виключає витрати, пов'язані з утилізацією небезпечних відходів. Перелік можливостей чищення піскоструменем здається нескінченним. Щодня сотні

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

компаній прибігають до допомоги абразивострумінного очищення для того, щоб вирішити проблеми довготривалого очищення і підготовки поверхні. Оскільки в промисловості регулярно винаходяться нові матеріали і виникає потреба в обробці нових поверхонь, виробникам абразивострумінної техніки і матеріалів доводиться безперервно удосконалювати свої технології і устаткування.

Піскоструй застосовується в галузях промисловості України, що використовують підвищену температуру для загартування металів. Високі температури можуть знебарвлювати вироби. Обробка піскоструєм дозволяє видаляти вицвілі ділянки і окалину з виробів, що піддалися дії високих температур. Крім того, піскоструменеве очищення може поліпшити зовнішній вигляд продукції завдяки видаленню різних плям, відкладень, корозії і слідів інструменту. При цьому деякі абразивні матеріали дозволяють робити зовнішній вигляд поверхні одноріднішим. При високій температурі утворюється і агар і відкладення відпрацьованої олії на багатьох автомобільних деталях. Електродвигуни часто засмічуються перегрітими ізоляційними матеріалами і розплавленими шарами статора. У більшості випадків збереження початкових розмірів цих деталей є критичним. Обробка за допомогою пластикових абразивних матеріалів, скляних кульок або натурального абразиву видаляє забруднюючі речовини і забезпечує бажаний результат.

Для оптимальної роботи піскоструменевого апарату необхідно виконати ряд досліджень спрямованих на правильний вибір комплектуючих його частин, а саме:

1. Потужний компресор
2. Міцна пневмомережа
3. Піскоструменевий апарат
4. Сопла.
5. Установка дистанційного управління.
6. Вологовідокремлювач.
7. Матеріал для піскоструйки.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

8. Захисний шолом.

9. Сушильна камера для відпрацьованого абразиву.

При виборі піскоструйного обладнання необхідно враховувати можливість перевезення обладнання.

Незважаючи на накопичені експериментальні дані, залишаються питання, які потребують додаткового дослідження.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		8



## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В даній роботі проводилося чисельне та експериментальне дослідження робочого сопла ежекторно-очисної установки, де в якості ежектора використовувалось піскоструменеве сопло, від ефективності якого залежить ефективність всієї піскоструменевої установки.

В робочому соплі змішуються два потоки: абразивного матеріалу та стисненого повітря. Течія через сопло в даній роботі досліджувалася чисельно та експериментально.

Для чисельного дослідження була створена розрахункова модель проточної частини досліджуваних об'єктів. Твердотільні моделі створювались в CAD-системі КОМПАС-3D V20.

Експорт побудованих варіантів проточних частин різноманітних форм робочих сопел з КОМПАС-3D V20 зберігаються в форматі (Parasolid) в Solid Works 2019, потім в форматі (\*.stl) в Flow Vision.

Для експериментального дослідження використовувався уніфікований експериментальний стенд по дослідженню піскоструменевої установки, що знаходиться на кафедрі ТТФ СумДУ.

**Мета** бакалаврської роботи полягає у виявленні резервів по підвищенню ефективності робочого процесу робочого сопла ежекторно-очисної установки за рахунок зміни його геометричних та режимних параметрів. Проведення розрахунків параметрів потоку абразивної суміші. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд завдань:

- Чисельно і експериментально дослідити робочий процес ежектора з отриманням його витратних характеристик;

- Провести оцінку розподілу параметрів потоку вздовж ежектора.

Базові геометричні параметри проточної частини сопла (ежектора):

- Внутрішній діаметр сопла  $d = 7$  мм;
- зовнішній діаметр сопла  $D = 18$  мм.
- довжина сопла  $l = 22$  мм.

За результатами виконаних досліджень проводитиметься пошук більш раціональної геометрії.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

## 2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЖЕКТОРА

Проводилися чисельні та експериментальні дослідження течії пісчано-повітряного потоку в робочому соплі ежекторно-очисної установки. Чисельні дослідження виконувались з використанням програмного комплексу Flow Vision. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії кафедри ТТФ на уніфікованому експериментальному стенді по дослідженню характеристик робочого сопла для очисної установки (піскоструменевої).

### 2.1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ПРОБЛЕМ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ

Оскільки суворе аналітичне опис робочого процесу в соплі в даний час не представляється можливим, методи розрахунку і проектування базуються на експериментальних даних, узагальнених в тій чи іншій мірі [1-12]. Широке дослідження ряду вітчизняних і зарубіжних організацій істотно розширили уявлення про характер і особливості робочого процесу.

Розвиток прикладної математики і обчислювальних комплексів надають нові можливості по моделюванню фізичних процесів. Крім того, використання гідродинамічних програмних комплексів при моделюванні складних явищ і процесів дозволяє, за допомогою візуалізацій, познайомитися з багатьма процесами які не можуть бути відтворені ніякими іншими способами. Однак при цьому зберігається визначальна роль натурального експерименту, оскільки, в кінцевому рахунку, тільки вони можуть служити показником коректності чисельного моделювання.

З урахуванням сказаного була поставлена задача більш детального експериментального і теоретичного дослідження процесів, що протікають в соплі з метою поліпшення їх ефективності.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

## 2.2 МЕТОДИКА ЧИСЕЛЬНОГО РОЗРАХУНКУ

Програмний комплекс FlowVision - комплексне багатоцільове рішення для моделювання тривимірних течій рідини і газу, створений командою розробників компанії ТЕСИС в тісній співпраці з науково-дослідними організаціями та промисловими підприємствами в Росії і за кордоном.

FlowVision 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, такими, як, турбулентність, горіння, контактні кордону розділу, пористість середовища, теплоперенос і так далі, в математичну модель включаються додаткові рівняння, що описують ці явища.

FlowVision використовує звичайно-об'ємний підхід для апроксимації рівнянь математичної моделі. Рівняння Нав'є-Стокса розв'язуються методом розщеплення по фізичним процесам (проекційний метод MAC).

FlowVision заснований на наступних технологіях обчислювальної гідродинаміки і комп'ютерної графіки.

- прямокутна розрахункова сітка з локальним подрібненням розрахункових осередків;
- апроксимація криволінійних кордонів розрахункової області методом підсіткового дозволу геометрії;
- імпорт геометрії з систем САПР і звичайно-елементних систем через поверхневу сітку;
- ядро програми написано на мові C ++;
- має клієнт-серверну архітектуру;
- призначений для користувача інтерфейс - для операційних систем MS Windows і Linux;
- система аналізу результатів розрахунків використовує високоякісну графіку на основі OpenGL.

Для рішення поставлених задач використовувались відповідні можливості програмного комплексу.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

## Модель двухфазного течії

Модель двухфазного течії рідини призначена для дослідження двофазних течій з вільною поверхнею. Ця модель використовується для визначення коефіцієнтів опору кораблів і підводних апаратів, заповнення форм розплавом металів і т.д. Модель використовує функцію VOF, приймаючи значення 0 (газ) і 1 (рідина). Вільна поверхня представляється набором фасеток, що відтинають розрахункову область. Розраховуються всі осередки, в яких присутня рідина.

## Дисперсна фаза

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

Характеристики частинок задаються звичайним чином у вікні властивостей елемента Частинок.

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

## Частинки

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

Модель Частинок 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. Щоб запустити розрахунок часток, необхідно поставити маркер близько "рівняння" Частинок в вікні Вибір моделі (малюнок 2.1)

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12



Малюнок 2.1 Вибір моделі розрахунку

Для чисельного моделювання використовувався програмний комплекс Flow Vision, 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.

FlowVision 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 [86, 87].

FlowVision використовує звичайно-об'ємний підхід для апроксимації рівнянь математичної моделі. Рівняння Нав'є-Стокса розв'язуються методом розщеплення по фізичним процесам (проекційний метод MAC).

Даний комплекс відрізняється простотою побудови розрахункової сітки, так щоб згенерувати сітку, досить задати лише кілька параметрів, після чого вона автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якої складності. Препроцесор, вирішувач і постпроцесор об'єднані і працюють одночасно.

Препроцесор служить для імпортування геометрії розрахункової

області з систем геометричного моделювання, завдання моделі середовища, розстановки початкових і граничних умов, генерації розрахункової сітки і завдання критеріїв збіжності, після чого управління передається вирішувач, який починає процес розрахунку. При досягненні необхідного значення критерію збіжності процес рахунку може бути зупинений.

Базовими в програмі FlowVision є рівняння Нав'є-Стокса (разом з рівнянням нерозривності). Для замикання цих рівнянь в залежності від конкретного завдання можуть використовуватися додаткові співвідношення, що описують зміну щільності, турбулентний перенос і т. П. Набори таких співвідношень в сукупності з рівняннями Нав'є-Стокса називаються моделями.

При моделюванні робочого сопла ежекторно-очисної установки використовувалися наступні моделі:

- k-ε модель турбулентного течії в'язкої рідини з невеликими змінами щільності при великих числах Рейнольдса;
- модель повністю стискуваної рідини (в термінології FlowVision): стаціонарне і нестаціонарне протягом при будь-яких числах Маха (до-, транс-, над- і гіперзвукові течії).

Для розв'язання виникаючої системи лінійних алгебраїчних рівнянь використовувався як неявний (більш надійний) варіант ітераційного процесу. Метод базується на підході Ейлера до опису руху рідини, суть якого полягає в тому, що різні скалярні і векторні величини розглядаються як функції змінних Ейлера.

Роботу в препроцесорів ділять на кілька етапів:

Постпроцесор використовувався для виведення і подання отриманих в результаті розрахунків даних. Дані виводилися на проміжних етапах розрахунку, і це дозволяло відстежувати динаміку модельованого процесу. При цьому крок за часом задавався постійним, а кінець розрахунку визначався збіжністю всіх розв'язуваних рівнянь. Головним критерієм встановлення стаціонарного режиму течії в ущільненні, є рівність масових витрат газу у вхідному і вихідному перерізі. Використовувалася можливість

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

комплексу з розрахунку течії в агрегаті з обертовими частинами. Якщо обертові частини (ротори) можуть бути оточені циліндричних поверхнями без перетину кордонів розрахункової області, застосовується технологія "змінних сіток": ротори розраховуються в обертових системах координат, нерухомі частини (статори, корпус) - в нерухомій системі координат. У разі моделювання вузла лабіринтового ущільнення ротори не можуть бути оточені циліндричними поверхнями, тому була застосована технологія "рухомих тіл". яких моделювання течії в проточних частинах турбін, компресорів, насосів, азів і рідин по каналах трубопроводах і т.д. FlowVision 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 [86, 87]. FlowVision використовує звичайно-об'ємний підхід для апроксимації рівнянь математичної моделі. Рівняння Нав'є-Стокса розв'язуються методом розщеплення по фізичним процесам (проекційний метод MAC). Даний комплекс відрізняється простотою побудови розрахункової сітки, так щоб згенерувати сітку, досить задати лише кілька параметрів, після чого вона автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якої складності. Препроцесор, вирішувачу і постпроцесор об'єднані і працюють одночасно.

Препроцесор служить для імпортування геометрії розрахункової області з систем геометричного моделювання, завдання моделі середовища, розстановки початкових і граничних умов, генерації розрахункової сітки і завдання критеріїв збіжності, після чого управління передається вирішувачу, який починає процес розрахунку. При досягненні необхідного значення критерію збіжності процес рахунку може бути зупинений. Базовими в програмі FlowVision є рівняння Нав'є-Стокса (разом з рівнянням нерозривності). Для замикання цих рівнянь в залежності від конкретного

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

завдання можуть використовуватися додаткові співвідношення, що описують зміну щільності, турбулентний перенос і т. П. Набори таких співвідношень в сукупності з рівняннями Нав'є-Стокса називаються моделями. При моделюванні вузла лабіринтового ущільнення використовувалися наступні моделі:

- k-ε модель турбулентного течії в'язкої рідини з невеликими змінами щільності при великих числах Рейнольдса;

- модель повністю стискуваної рідини (в термінології FlowVision): стаціонарне і нестаціонарне протягом при будь-яких числах Маха (до-, транс-, над- і гіперзвукові течії).

Для розв'язання виникаючої системи лінійних алгебраїчних рівнянь використовувався як неявний (більш надійний) варіант ітераційного процесу. Метод базується на підході Ейлера до опису руху рідини, суть якого полягає в тому, що різні скалярні і векторні величини розглядаються як функції змінних Ейлера.

Використовувалася можливість комплексу з розрахунку течії з частинами. В якості об'єкта чисельного дослідження на першому етапі використана модельна установка, що забезпечує умови роботи, максимально наближені до реальних. Дослідження проводилися на натурних умовах. Течію вважали турбулентною і осесиметричною. Використана k-ε - модель турбулентності. В якості вихідних даних задавалися граничні умови  $p$  і  $T$  у вхідному перетині сопла.

В результаті розрахунків визначалися значення величин протікання через сопло, розподіл тиску по його довжині, швидкостей і щільності. Отримано візуалізації течії у вигляді полів (залівок) швидкості, тиску, щільності, векторів, спалахів (анімації руху потоку) і ізоліній.

Прийняті допущення:

Моделювання течії проводилося в стаціонарній постановці, повітря розглядався як досконалий газ. Поверхні стінок проточної частини приймалися гідравлічно гладкими. Стінки проточної частини - адіабатичні.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16



Завдання граничних умов:

Розрахункова область є нероздільною.

На даному етапі визначалися типи граничних умов і їх привласнення на конкретних поверхнях.

При розрахунку сопла виділені наступні типи граничних умов:

- "Вхід" - вхідний перетин сопла;
- "Вихід" - вихідна перетин сопла;
- "Стінка" - "тіло" сопла.

Супергрупи створювалися на граничних умовах «Вхід» і «Вихід», після чого експортувалася в постпроцесор, як складний фасеточний об'єкт на якому були побудовані шари візуалізації (залівка, вектора, ізолінії, спалахи). Також будувалися такі характеристики, як: тиск, температура, щільність і швидкість. Основний необхідністю створення супергруп на вході і виході є забезпечення можливості порівняння масової витрати, що впадає в ущільнення і який із нього. Знаки «+» і «-» відповідають втеканія і витікання потоку маси через робочу область. На виході з ущільнення в характеристиках завжди буде стояти мінус перед значенням масової витрати. Всі параметри відлічувалися щодо заданим опорним величинам, відповідним атмосферних умов.

Вхідними крайовими умовами є значення тиску і температури. Для отримання задовільною збіжності розрахунків на натурних умовах, необхідно в якості опорних величин задавати тиск на вході в ущільнення, відповідно у вхідному перетині задається  $p = 0$ , а тиск на виході зі знаком "-". Температура на вході приймалася незмінною при будь-яких значеннях ущільнюваного перепаду  $p_1/p_2$ , в силу несуттєвого її впливу.

Побудова і адаптація розрахункової сітки

В Flow Vision чисельне інтегрування рівнянь по просторовим координатам проводиться з використанням прямокутної адаптивної локально подрібненої сітки. Такий підхід забезпечує, з одного боку, використання простої рівномірної неадаптивної сітки при вирішенні завдань з відносно нескладною геометрією. З іншого боку, з'являється можливість при

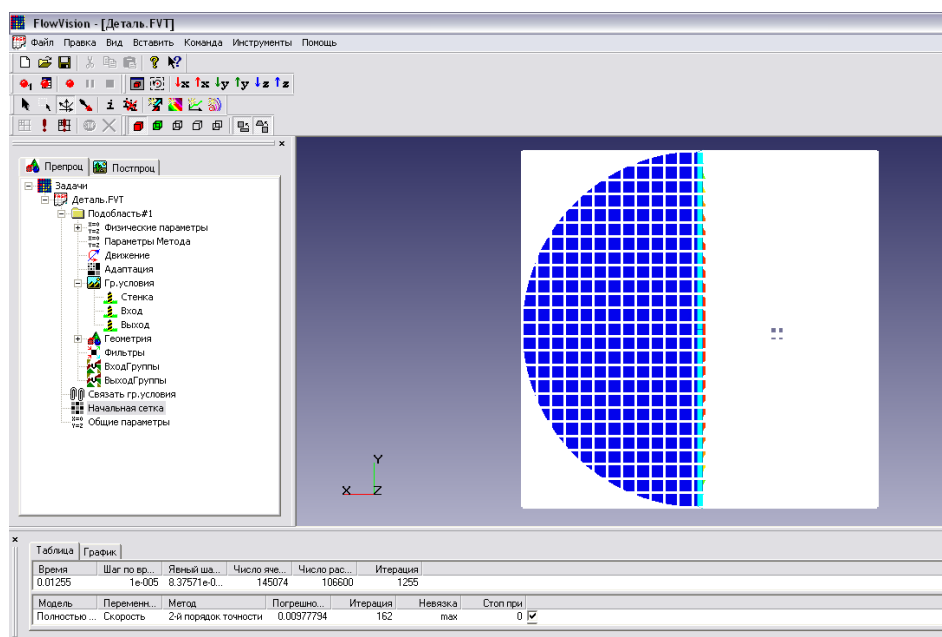
					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

вирішенні завдань зі складною геометрією проводити адаптацію (підстроювання) сітки до особливостей геометрії поблизу кордонів.

На першому етапі вводяться ряд параметрів, що характеризують розмір майбутньої сітки (осередків). Наступний етап - уточнення розрахункової сітки - пов'язаний з процесом адаптації початкових розрахункових осередків. Суть адаптації полягає в подрібненні осередків в тих областях, де передбачається, що початкова сітка є грубою і адекватно не відображає зміни, що відбуваються фізичних параметрів.

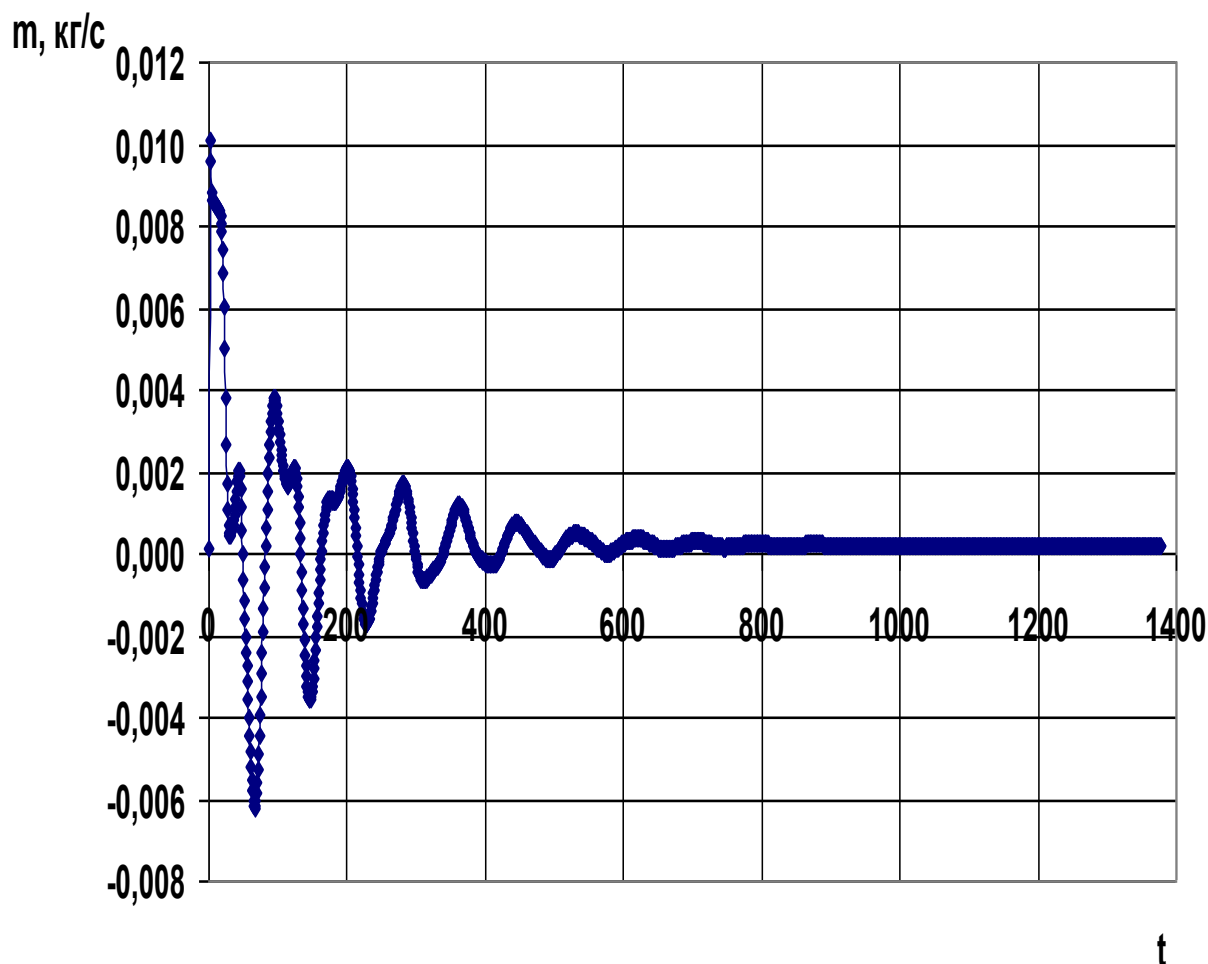
Інтерфейс FlowVision включає можливості автоматичного і ручного контролю формування сітки, в тому числі додавання (видалення) осередків сітки в певних областях.

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 (малюнок 2.2). Збіжність результатів оцінювалася за інтегральними характеристиками у вхідному і вихідному перетинах ущільнення.



Малюнок 2.2 Розрахункова сітка робочого сопла

Була проведена серія розрахунків сопла розрахунковими сітками, що мають різну кількість осередків, з метою виявлення найкращого її варіанту. В результаті було вибрано раціональну кількість розрахункових осередків рівню  $N = 110000$ . Програмний комплекс оперує сітьмома моделями турбулентності. За найпоширенішим для подібних завдань моделям турбулентності (SST, стандартна  $k - \varepsilon$ , SA, низько - Рейнольдсова модель AKN) проведена серія порівняльних розрахунків, що не виявила суттєвих розбіжностей між ними. Була обрана стандартна  $k - \varepsilon$  модель, оскільки вона добре узгоджується з більшістю відомих досліджуваних моделей течії газів.



Малюнок 2.3 Збіжність отриманих результатів чисельним шляхом

Для обраної моделі повністю стискуваної рідини, крок за часом залежить від збіжності рівнянь по тиску, тому він спочатку задається рівним однієї десятої прогонової часу, потім зменшується в разі відсутності

збіжності. Як приклад (малюнок 2.3) показана збіжність результатів чисельного моделювання по масовій витраті  $m$ .

Значну увагу було приділено питанням методики візуального представлення результатів чисельного дослідження течії в лабіринтовому ущільненні у вигляді полів тиску, швидкості і щільності, виконані в кольоровій гамі (т. Зв. "Заливки"), полів векторів швидкості, ізоліній - ліній рівних значень параметрів [88 - 90].

Нижче більш детально описана робота по наладці програмного комплексу до вирішення поставлених задач.

### **Розглянемо алгоритм моделювання в пакеті Flow Vision**

FlowVision використовують прямокутну адаптивну сітку з локальним подрібненням. Для апроксимації криволінійної геометрії з підвищеною точністю FlowVision використовує технологію подсеточного дозволу геометрії. Ця технологія дозволяє імпортувати геометрію з систем САПР і обмінюватися інформацією з системами кінцево-елементного аналізу. Використання цієї технології дозволило вирішити проблему автоматичної генерації сітки – щоб згенерувати сітку, досить задати лише кілька параметрів, після чого сітка автоматично генерується для розрахункової області, що має геометрію будь-якого ступеня складності.

FlowVision побудований на базі єдиної інтегрованої середовища, в якій препроцесор, вирішувач і постпроцесор об'єднані і працюють одночасно.

У функціональне призначення Препроцесора входить імпортування геометрії розрахункової області систем геометричного моделювання, завдання моделі середовища, розміщення початкових і граничних умов, генерація або імпорт розрахункової сітки і завдання критеріїв збіжності.

Після цього управління передається Решателю, який починає процес рахунку. При досягненні необхідного значення критерію збіжності процес рахунку може бути зупинений.

					<b>ХК 06.00.00.00. ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

Результати розрахунку безпосередньо під час рахунку доступні для Постпроцесора, в якому проводиться обробка даних - візуалізація результатів і збереження їх у зовнішні формати даних.

#### Фізико-математичні моделі

Базовими в програмі Flow Vision є рівняння Нав'є–Стокса (разом з рівнянням нерозривності). Для замкнення цих рівнянь в залежності від конкретної задачі можуть використовуватися додаткові співвідношення, які описують зміну щільності, турбулентний перенос і т. п. Набори таких співвідношень в сукупності з рівняннями Нав'є–Стокса називаються моделями. У Flow Vision найбільш повно представлені наступні моделі:

- наближення Буссинеска (малі зміни щільності) для опису ламінарного течії в'язкої рідини при малих числах Рейнольдса;
- k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами щільності при великих числах Рейнольдса;
- модель слабкостиснуваної рідини (в термінології Flow Vision), яка дозволяє розраховувати стаціонарне дозвукове протягом газу при будь-яких змінах щільності;
- модель повністю нестисливої рідини (в термінології Flow Vision): стаціонарне і нестаціонарне протягом при будь-яких числах Маха (до-, транс-, понад - і гіперзвукові течії).

Flow Vision припускає також використання моделі теплопереносу в твердому тілі, сопрягаемой з перенесенням тепла і речовини в рідині (газі). Крім того, в Flow Vision включені кілька спеціальних моделей (безпосередньо не пов'язаних з рівняннями Нав'є–Стокса), з яких у навчальну версію пакету входять тільки моделі вільної поверхні, течії двофазного і одна з моделей горіння.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

## Граничні і початкові умови

У комплексі Flow Vision допускається використання широкого набору граничних умов, що залежать від конкретної моделі, однак всі вони базуються на наступних найбільш часто зустрічаються умовах на гідродинамічні змінні (тиску і швидкості):

- умови прилипання або прослизання рідини, що задаються для вектора швидкості на кордонах з твердими тілами;
- умови на значення тиску, зазвичай задаються на межах;
- умови на значення швидкості потоку по нормалі до межі або під кутом до нормалі;
- умова витікання з нульовим градієнтом тиску;
- комбінації умов, перерахованих вище, наприклад, вільне витікання рідини з нульовими градієнтами тиску та швидкості або задані на кордоні значення тиску і швидкості.

Слід зауважити, що конкретні граничні умови, як і значення параметрів рівнянь (щільність, в'язкість, теплопровідність тощо), можуть задаватися змінними за часом.

Початкові умови необхідно задавати при розгляді моделей, відповідних нестационарним руху. В залежності від виду моделюючих рівнянь в початковий момент часу у всіх точках розрахункової області задаються значення шуканих функцій і (або) деяких похідних від них, причому ці значення можуть бути різними в різних частинах області.

Опишемо послідовність дій, необхідної для рішення поставленої задачі в пакеті Flow Vision. Слід зауважити, що перше з цих дій виконується за допомогою зовнішньої програми — геометричного препроцесора.

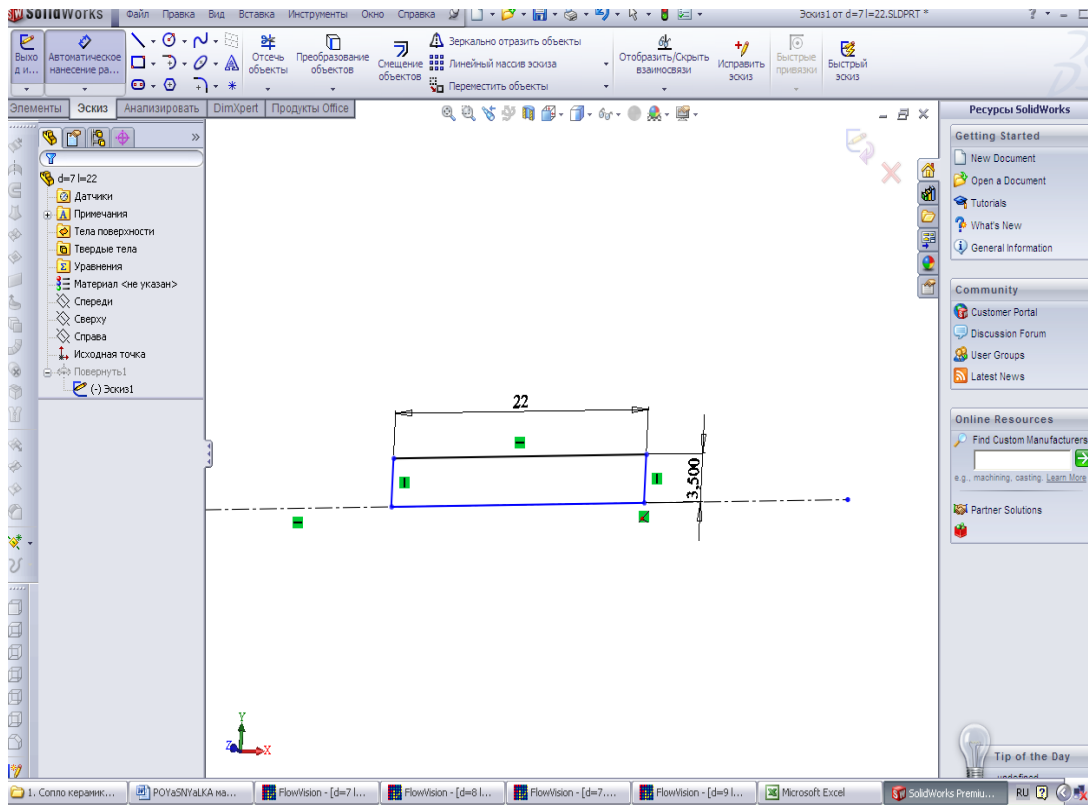
В якості такого препроцесора використовується пакет КОМПАС-3D V12, що відноситься до сімейства CADов (Computer-Aided Design — автоматизоване проектування), які отримали широке поширення в сучасній науковій та інженерній практиці.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

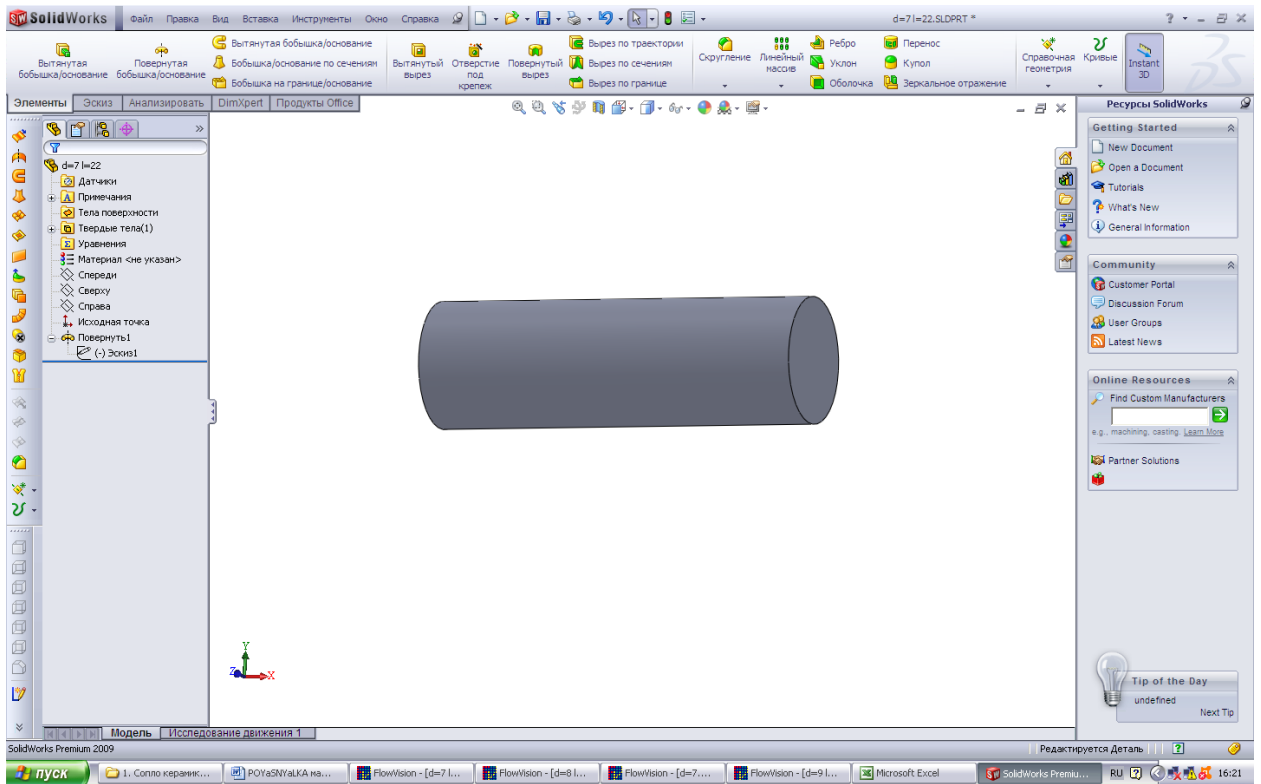
## Геометричний препроцесор (КОМПАС-3D V12)

1. Створення геометрії (розрахункової області). Після запуску програми КОМПАС-3D V12 слід натиснути на кнопку «Створити» і вибрати «Деталь». У лівій частині вікна нової деталі потрібно виділити «Площина 1», після чого натиснути на третю зверху кнопку «Ескіз» на правій панелі інструментів. Для зручності дотримання потрібних розмірів доцільно нанести масштабну сітку (0.1 м) між основними лініями за допомогою натискання на другу зверху кнопку тій же панелі з наступною установкою прапорця «Відображати масштабну сітку». В якості елементів розрахункової області найчастіше використовуються прямокутник, лінія, окружність або її частина; вони створюються відповідно за допомогою кнопок «Прямокутник», «Лінія», «Коло», «Дуга через 3 точки», які знаходяться на правій панелі інструментів. Щоб намалювати складні фігури типу еліпса (якого немає на панелі інструментів), слід вибрати пункт меню «Інструменти/Об'єкти ескизу». Масштаб (розмір зображення на екрані) змінюється або з допомогою колеса миші, або після натиснення кнопки «Збільшити/зменшити вид» у верхній частині екрана — переміщенням покажчика миші вгору або вниз при натиснутій лівій кнопці. За допомогою пункту меню «Вставка/Підстава/Витягнути...» — «ОК» накреслене замкнутий контур (прямокутник) перетворюється в тривимірне тіло (ще раз зазначимо, що пакет Flow Vision працює тільки з тривимірної геометрії). Розмір по третій координаті (0.01 м) тут не потрібно змінювати (у плоских задачах він несуттєвий). Нижче наведена розрахункова модель (малюнок 2.4 – 2.6).

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23



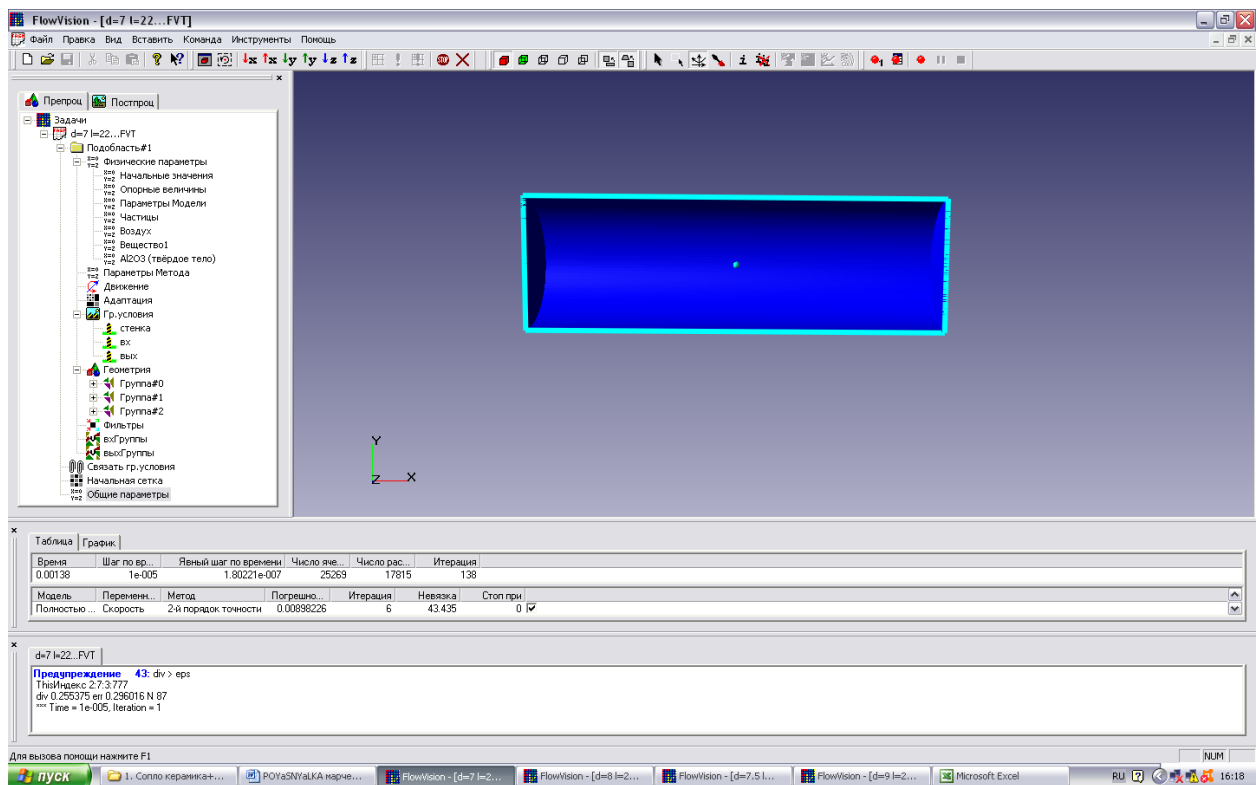
Малюнок 2.4 Ескіз моделі



Малюнок 2.5 Твердотільна модель досліджуваного об'єкта

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		24





Малюнок 2.6 Розрахункова модель проточної частини щілини

Модель розрахунку – повністю стискаєма рідина.

## ЗАВДАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ В ПРЕПРОЦЕСОРІ

Склад і призначення основних моделей пакету

Розглянемо логічну структуру пакету Flow Vision.

Як і більшість програм для чисельного моделювання, пакет Flow Vision формально ділиться на 3 модулі, звані препроцесором, солвером і постпроцесором.

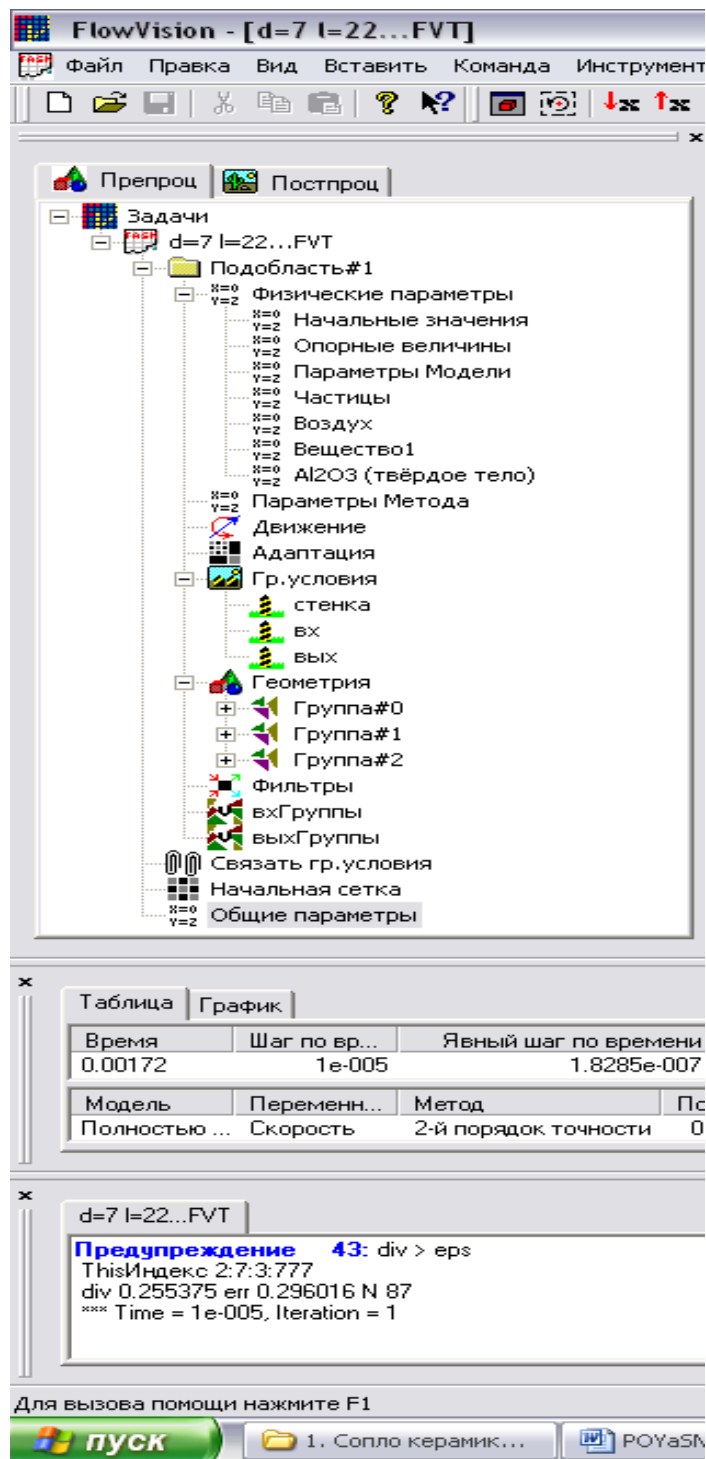
Препроцесор

Препроцесор виконує такі основні функції:

- Побудова геометричної основи завдання — розрахункової області, яка формується з допомогою зовнішніх програм (так званих геометричних препроцесорів) і потім імпортується в Flow Vision. Слід зауважити, що Flow Vision працює тільки з тривимірної геометрії, тому двовимірні моделі необхідно розглядати як окремий випадок тривимірних.

					<i>Лист</i>
					<i>25</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>ХК 06.00.00.00. ПЗ</i>

- 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.



Малюнок 2.7 Дерево препроцесора

										Лист
										26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

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 підобласті допускається завдання своєї моделі (див. нижче): наприклад, ламінарна течія нестисливої і нестисливої рідини, турбулентний, багатофазне течії і т. д. У свою чергу сайт «Подобласть» містить дочірні вузли для завдання граничних умов на розрахункові змінні (вузол «Гр. умови»), початкових умов у всій розрахунковій області (вузол «Початкові значення») і власне фізичних параметрів, що визначають коефіцієнти рівнянь (вузол «Речовина 0»), а також вузли для вводу і зміни параметрів чисельного розрахунку (вузол «Параметри методу»).

### **Фізико-математична постановка задачі**

Вибір математичної моделі (набору рівнянь). Розкрити дерево, клацнувши лівою кнопкою миші по вузлу , потім виділити правою кнопкою вузол дерева «Подобласть#1». У контекстному меню вибрати пункт «Змінити модель...», далі у вікні, вибрати один їх пунктів списку «Модель» (в більшості прикладів, розглянутих нижче, вибирається «ламінарними рідина» - так називається модель ламінарної течії нестисливої рідини в термінах Flow Vision).

Введення фізичних параметрів. Через контекстне меню вузла дерева «Речовина 0» відкрити вікно властивості речовини (рідини / газу); вибрати потрібні параметри (при необхідності можна користуватися стрілками). Потім у верхньому рядку таблиці ( «Значення») числових значень параметрів натиснути кнопку, а потім або закрити вікно властивостей, або «прикріпити» () його до екрану. Основними параметрами є «Щільність» і «Молекулярна в'язкість».

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Введення граничних умов. В гілки дерева «Гр. умови» виділити відповідну кордон в дереві (при цьому в правій (основний) частини вікна позначена межа забарвлюється в колір, заданий раніше). Далі відкрити вікно редагування граничної умови, або через пункт контекстного меню «Редагувати», або через кнопку «Ed» у вікні властивостей. Можливі такі характерні комбінації типів граничних умов:

а) «Тип кордону» - «Стінка»; «Тип граничного умови» - «Стінка з проскальзиванієм» (звернення в нуль нормальної компоненти швидкості) або «Стінка» (звернення в нуль всіх компонент швидкості);

б) «Тип кордону» - «Вхід / вихід», «Тип граничного умови» - «Нормальний вхід / вихід» або «Тиск на вході»;

в) «Тип кордону» - «Вільний вихід», «Тип граничного умови» - «Нульове тиск / вихід».

Примітка. Для полегшення подальшої роботи кордону бажано перейменувати (назвавши «Стінка», «Вхід», «Вихід» і т.п.) або через пункт контекстного меню «Перейменувати», або через вікно властивостей граничної умови.

Введення початкових умов за допомогою фільтра.

У препроцесорів правою кнопкою миші клацнути по значку «Фільтри», потім - «Створити» У списку «Об'єкт» вибрати «Весь простір», в списку «Тип» - «Установка змінної». У вкладці «Встановити значення» вибрати тип фільтра «Одноразовий», вибрати назву змінної (наприклад, «x-Швидкість») і ввести значення змінної.

Дуже важливим є правильне завдання варіанту розрахунку в програмному комплексі FlowVision.

Підготовка до чисельного моделювання

2. Побудова розрахункової сітки. У вікні властивостей об'єкта «Початкова сітка», що знаходиться у вкладці «X-напрямок» дерева препроцесора, слід задати число осередків вздовж напрямку руху потоку (в залежності від постановки задачі), після чого натиснути на кнопку «рівних.» ( «Рівномірна

										Лист
										29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

ХК 06.00.00.00. ПЗ

сітка» ). Те ж саме слід зробити з сіткою в поперечному напрямку, перейшовши у вкладку «Y-напрямок» в тому ж вікні. Слід зазначити, що число розрахункових осередків в цьому випадку може бути менше, проте поперечний розмір самої комірки з урахуванням всього поперечного розміру області, як правило, повинен бути менше.

У випадках, коли потрібно згустити сітку, в деяких частинах розрахункової області слід провести візуалізацію розрахункової сітки, для чого необхідно натиснути відповідну кнопку в вікні властивостей сітки. Для додавання додаткових ліній сітки слід виділити у вікні властивостей сусідню з додається лінію (вертикальну у вкладці «X-напрямок» або горизонтальну у вкладці «Y-напрямок»). При цьому додана лінія виділяється червоним кольором. Після цього слід натиснути кнопку «Вставити».

3. Введення установок чисельного розрахунку здійснюється за допомогою вкладки «Кроки» у вікні властивостей вузла дерева препроцесора «Загальні параметри». При цьому, як правило, параметри адаптації сітки: вузол дерева «Адаптація», параметри чисельного методу - вузол «Параметри методу» - змінювати не потрібно.

Основні параметри розрахунку - «Макс. крок» і «CFL» («неявний CFL», розташований зліва від «Макс. крок») - визначають вибір програмою розрахункового кроку за часом. CFL - це т. Зв. число Куранта; його фізичний зміст можна трактувати як максимальне число осередків сітки, яке малий обсяг рідини може подолати за один крок за часом. За замовчуванням  $CFL = 1$ , і в цьому випадку обсяг зміщується за часом не більше ніж на одну клітинку. Однак для підвищення швидкості розрахунку можна задавати інші значення CFL.

Параметр «Макс. крок» володіє великим пріоритетом, ніж CFL, тому керувати кроком по часу рекомендується саме через цей параметр. При виборі кроку за часом варто попередньо оцінювати характерний час перебігу через одну клітинку  $\tau$ :  $\tau \sim L / (N \cdot u)$ , де  $L$  - розмір області в напрямку течії,  $N$  - число розрахункових осередків в цьому напрямку,  $u$  - характерна швидкість течії. При обраному розрахунковому кроці за часом, значно більшому  $\tau$

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

(більш ніж на 2 порядки), точність рішення виявиться низькою або чисельне рішення задачі не буде відповідати фізичному сенсу: значення шуканих величин в різних розрахункових точках будуть відрізнятися на багато порядків (це називається розбіжним рішенням) . З іншого боку, при кроці за часом, істотно меншим  $\tau$ , чисельне рішення буде добре сходиться до точного (наприклад, аналітичного) вирішення, однак для його отримання потрібно занадто багато розрахункового часу (що є невиправданим в умовах обмеженості часу).

*Умовно роботу в препроцесорів можна розділити на кілька етапів:*

#### Солвер

Солвер забезпечує чисельну рішення поставленого завдання і як такої «невидимий» для користувача (хоча багато його параметри задаються в препроцесорів). Робота з Солвер в Flow Vision зводиться до вибору пунктів меню «Команда» ( «Почати обчислення», «Сітка & Обчислення», «Зупинити обчислення») або до натискань відповідних кнопок панелі інструментів. Якщо не брати до уваги операцій створення, відкриття і збереження файлу, майже вся інша робота з пакетом (т. Е. З його препроцесором і постпроцесор) можлива без використання меню і панелі інструментів. Для цього в лівій частині вікна Flow Vision розташовані дві вкладки «Препроц.» І «Постпроц.», В кожній з яких знаходиться дерево для показу всіх елементів моделі і виконання дій з ними.

#### Постпроцесор

Постпроцесор служить для виведення і уявлення, перш за все візуалізації отриманих в результаті розрахунків даних. В Flow Vision використовується великий набір методів візуалізації, які

класифікуються за типом подаються математичних величин: скалярна величина, скалярний поле, векторне поле (швидкості), а також по використовуваної геометрії (тривимірної або двовимірної). Важливо, що дані можуть виводитися на будь-якому етапі розрахунку, і це дозволяє відстежувати динаміку моделюваного процесу.

Дерево постпроцесора містить наступні вузли:

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- «Види» - для зміни точки зору на тривимірне тіло (проекції тіла на площину екрану): за допомогою дочірніх вузлів вузла «Види» можна поєднати площину екрану з однією з площин (x, y) або (x, z) або (y, z);

- «Змінні» - містить вузли, відповідні змінним моделі (їх перелік залежить від моделі).

- «Шари» - для управління всіма графічними елементами (так званими «шарами візуалізації», які відображаються в правій частині вікна).

- «Об'єкти» - для редагування об'єктів (ліній, площин, паралелепіпедів), службовців геометричній основі шарів.

Для виконання дій з вузлами дерев препроцесора або постпроцесора, як правило, необхідно викликати контекстне меню, натискаючи на відповідний вузол правою кнопкою миші. Найбільш часто використовується пункт «Властивості», що відкриває типові вікно з параметрами виділеного в дереві об'єкта. Для того щоб виключити необхідність щоразу закривати і відкривати знову вікно властивостей, рекомендується «прикріпити» це вікно до екрану (натиснувши в ньому кнопку). Після введення будь-якої інформації для її збереження слід натискати кнопку в вікнах властивостей і кнопку «ОК» в інших діалогових вікнах. Вікно властивостей, що виникає для створення будь-якого вузла дерева, після збереження введених даних слід закривати (натисканням на кнопку в кутку вікна).

#### Моделювання за допомогою Солвер

4. Розрахунок завдання виконується натисканням кнопки (в перший раз) або кнопки. У процесі розрахунків слід звертати увагу на нижню частину вікна Flow Vision, де відображаються поточний час, крок за часом і (в стовпці «Похибка») максимальні похибки в обчисленні тисків і швидкостей. У коректному розрахунку ці похибки не повинні перевищувати 0.01 (1%). Слід зазначити, ця похибка відноситься до одного кроку за часом і має лише непряме відношення до точності одержуваного кінцевого рішення. Розрахунок припиняється натисканням кнопки.

Щоб почати роботу з препроцесором, бажано, щоб перед цим всі змінні отримали свої характерні значення, що не суперечать фізичному сенсу

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

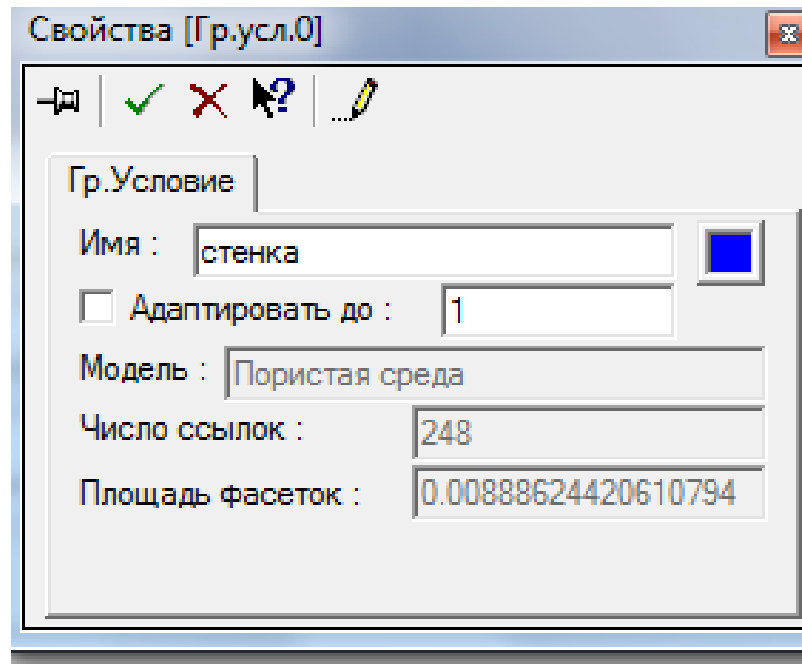
завдання; для цього слід провести попередній тестовий розрахунок (3-10 кроків за часом). Якщо цього не зробити, багато максимальні і мінімальні значення параметрів в постпроцесорі (наприклад, на осях графіків) доведеться вводити вручну. Остаточний розрахунок проводиться після налаштування параметрів постпроцесора (див. Нижче). При цьому розрахунок стаціонарних задач слід завершувати, коли протягом можна вважати сталим (візуальна картина отриманого течії залишається постійною, а значення параметрів змінюються з часом «досить мало»). Більш точні способи оцінки моменту зупинки розрахунку базуються на аналізі динаміки інтегральних показників, яку можна вважати експоненційної: Наприклад, ставлення першої і другої похідної будь-якої характеристики за часом  $(\frac{d^2y}{dt^2})$  дає показник експоненти  $a$ , з якого можна оцінити необхідний час розрахунку:  $t = \frac{1}{a} \ln(\frac{1}{\epsilon})$ , де  $\epsilon$  - необхідна точність рішення.

Повернення розрахунку в початковий стан, як правило, необхідно проводити після виправлення істотних помилок в даних, введених в препроцесор: такі помилки можуть проявлятися в повідомленнях про помилки, наприклад, у вигляді дуже великих ( $1e + 10$ ) погрешності або в принципово неправильному характері спостережуваного течії. Для повернення до початку в вікні властивостей вузла дерева препроцесора «Загальні параметри» у вкладці «Старт» необхідно зняти прапорець «Продовжувати обчислення», а у вкладці «Час» ввести значення 0 в полі «Сейчас». При проведенні розрахунків слід враховувати також, що розраховуються змінні зберігаються в файлі Flow Vision: в процесі розрахунків зберігаються кожні N кроків за часом, де N за замовчуванням становить 50, а може бути змінено в полі «Частота автосохранения / За итерациям» тієї ж вкладки «Час ».

Визначення розрахункових областей.

					ХК 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		





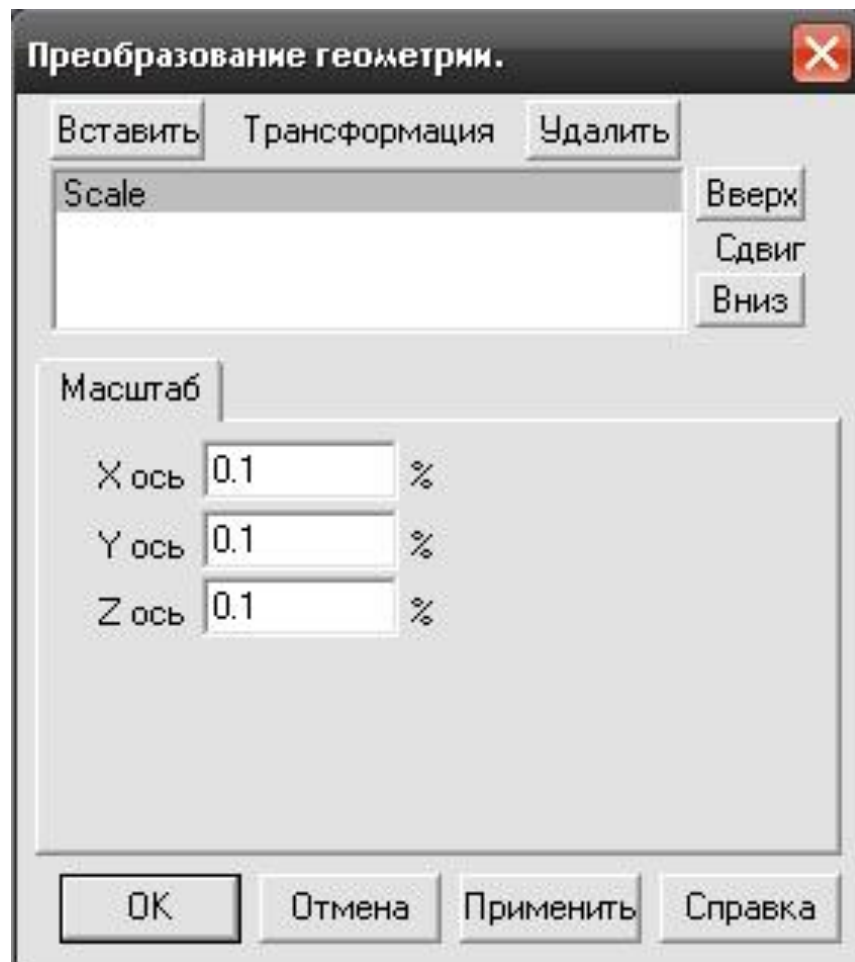
Малюнок 2.8 Геометричні групи (стінка, вхід, вихід, гр. Ум 3, гр. Ум. 4)

Після імпорту твердотільної моделі проточної частини, використовуючи опції дерева препроцесора (малюнок 2.8), проводиться визначення розрахункових областей, які в ході аналізу геометрії виявила програма. Для цього, виділяючи кожну область за допомогою миші у вікні препроцесора і спостерігаючи за активізацією в графічному вікні відповідної їй геометричній області, виконуємо визначення розрахункових областей. Перша область, в нашому випадку, з назвою «статор», відповідає проточної частини робочого колеса. Друга, з назвою «ротор» - проточної частини лопатки дифузора.

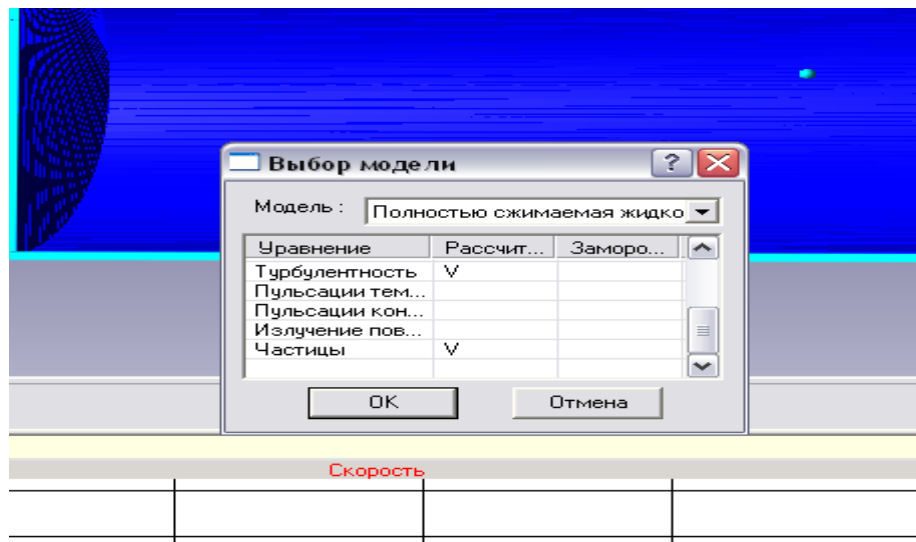
Розглянемо визначення розрахункових областей на прикладі робочого колеса. Як видно з дерева препроцесора - воно складається з 4-х геометричних груп.

Кожній геометричній групі необхідно привласнити своє граничне умова. Для цього створюємо в препроцесорів 4 ГУ, відповідні стінці, входу виходу, гр. ум. 3 і гр. ум. 4 (періодика або симетрія в разі розрахунку сектора деталі). Далі у властивостях геометрії присвоюємо кожній геометричній групі своє граничне умова.

Так само необхідно звернути увагу на площу геометричних груп в таблиці геометрії. Може таке бути що в графічному редакторі модель створювалася в мм, а FlowVision прийняв за м. Тоді необхідно змінити геометрію, шляхом масштабування (вгорі інструменти - Змінити геометрію; далі натиснути вставити і вибрати масштаб).



Малюнок 2.9. Вікно зміни геометрії



Малюнок 2.10 Вибір моделі розрахунку

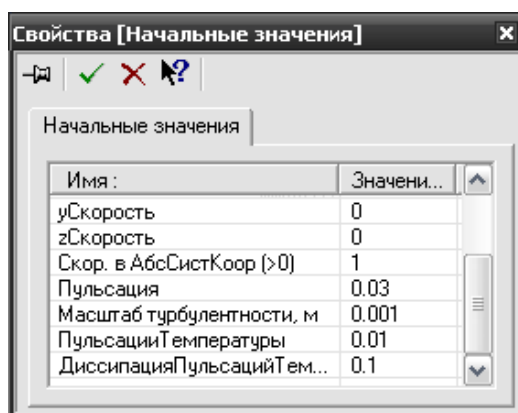
Вибір моделі розрахунку - один з ключових етапів побудови завдання. Для кожної розрахункової області задається модель розрахунку. Спочатку все області, визначені програмою, мають статус нерозрахункової області. Областям з назвою «РК» і «ЛД» ставимо в відповідність модель розрахунку з назвою «Пориста середовище». Для виконання описаних вище дій використовуємо діалогове вікно «Вибір моделі» (малюнок 2.10). Там же можна вибрати по яким рівнянням відбуватиметься розрахунок, проставивши галочки в стовпці «Розраховувати».

#### *Завдання параметрів моделі*

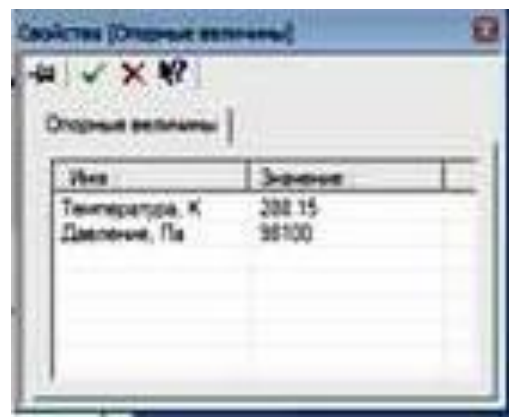
Параметри моделі розділені на дві групи: фізичні параметри моделі і параметри методів розрахунку. У дереві вони представлені елементами: Фізичні параметри і Параметри методу. Причому фізичні параметри розділені ще на 5 підгруп: початкові і опорні значення змінних; константи, що входять в рівняння математичної моделі; властивості речовин (для двох компонент).

Для кожної розрахункової області задаються значення опорних величин, які відображають зовнішні умови (рисунок 2.11, б). Для даного розрахунку це значення повної температури перекачується газу і повного тиску на вході в компресор. Щодо цих значень буде вестися розрахунок.

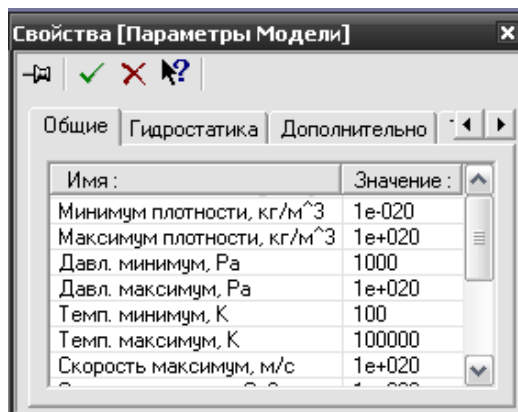
У діалогових вікнах «Початкові значення» (рисунок 2.11, а) і «Параметри Моделі» (рисунок 2.11, в, г) визначаються відповідні величини. Вікно «Початкові значення» дозволяє визначити в кожній розрахунковій області значення тиску і температури в збільшенні щодо опорних величин, а також характеристики турбулентності (пульсація і масштаб турбулентності) і значення компонент швидкостей по осях координат в початковий момент часу. У вікні «Параметри моделі» (зкладка «загальне») ми встановлюємо межі зміни щільності, тиску, температури, швидкості та ін. В закладці «турбулентність» можна вибрати модель турбулентності. У моїй роботі застосовувалася SST модель турбулентності (модель Ментора).



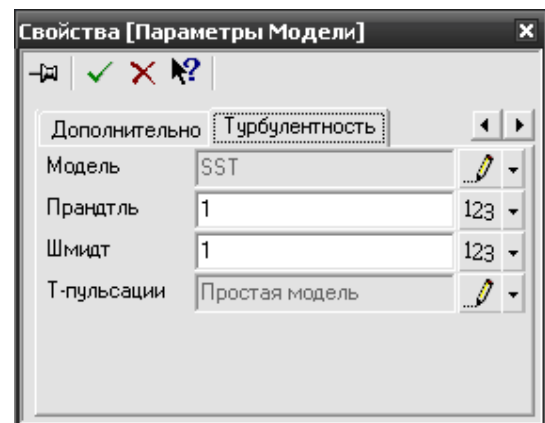
а)



б)

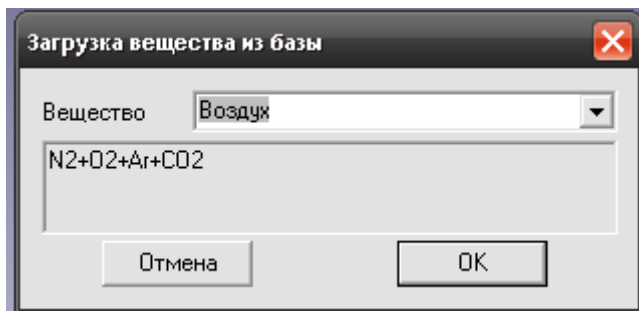


в)



г)

Малюнок 2.11 Завдання початкових значень і параметрів моделі (а - діалогове вікно «Початкові значення»; б - діалогове вікно «Опорні величини»; в - діалогове вікно «Параметри моделі», закладка Загальні; г - діалогове вікно «Параметри моделі», закладка Турбулентність;)



Малюнок 2.12 Вікно бази даних

Заключним етапом формування фізичних параметрів в задачі є завдання властивостей робочої речовини, яке проводиться з

спливаючого меню опції «Речовина» вибором команди або «Завантажити з бази» (малюнок 2.12), або «Властивості». При використанні команди «Завантажити з бази» всі необхідні для розрахунку фізичні характеристики робочої речовини будуть завантажені з бази даних.

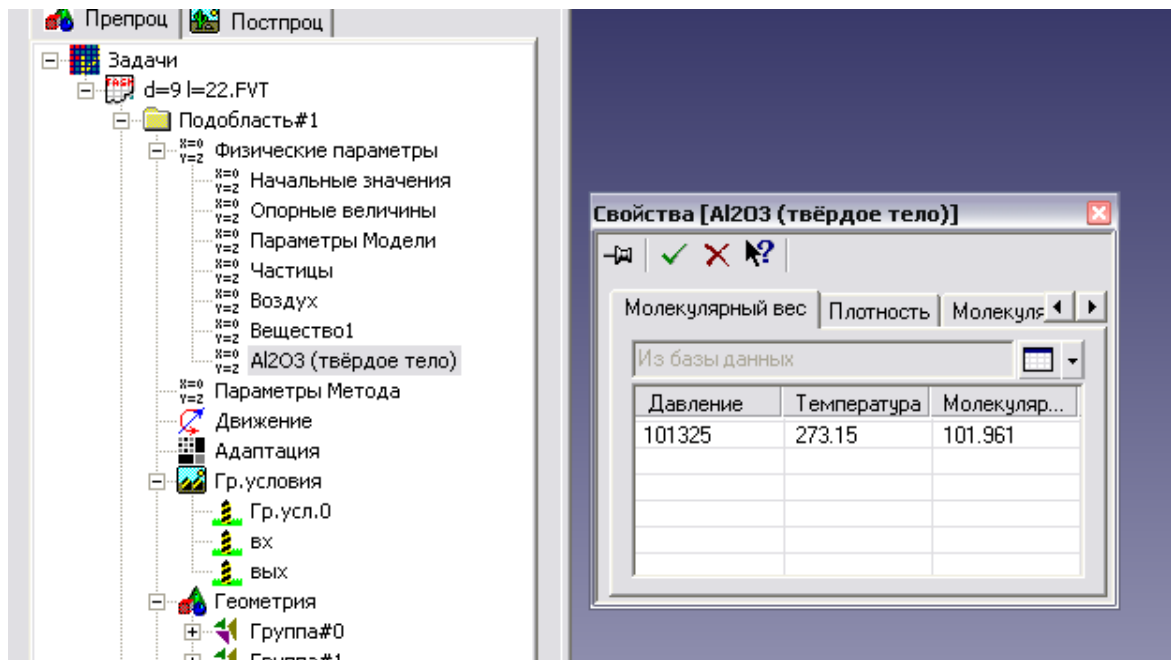
База даних програми FlowVision містить великий, постійно розширюється, набір речовин, в тому числі, і в їх різних агрегатних станах (газ, рідина, тверде тіло). На сьогоднішній день з урахуванням різних агрегатних станів в ній представлено понад тридцять речовин.

Для кожного компонента є набір фізичних властивостей, які представлені у вигляді залежності від температури і тиску. Перелік фізичних характеристик речовини визначено колом розрахункових моделей програми.

Додатково, для газоподібних станів речовини в базі даних визначено закон, який встановлює співвідношення між щільністю, тиском і температурою (за замовчуванням прийнято закон ідеального газу). Але можна також задавати будь-який закон зміни. У нашому випадку застосовується закон для ідеального газу. У цьому завданні його можна використовувати так як робоче тіло - повітря і ступінь підвищення тиску невелика.

У діалоговому вікні «Параметри методу» можна вибрати з якою точністю буде проходити розрахунок для тієї чи іншої величини і за яким методом. У моїй роботі використовується 2-й порядок точності для визначення змінних.

Параметри двухфазного середовища задаються в діалоговому вікні частинки (малюнок 2.13).



Малюнок 2.13 Вікно задання параметрів частинки

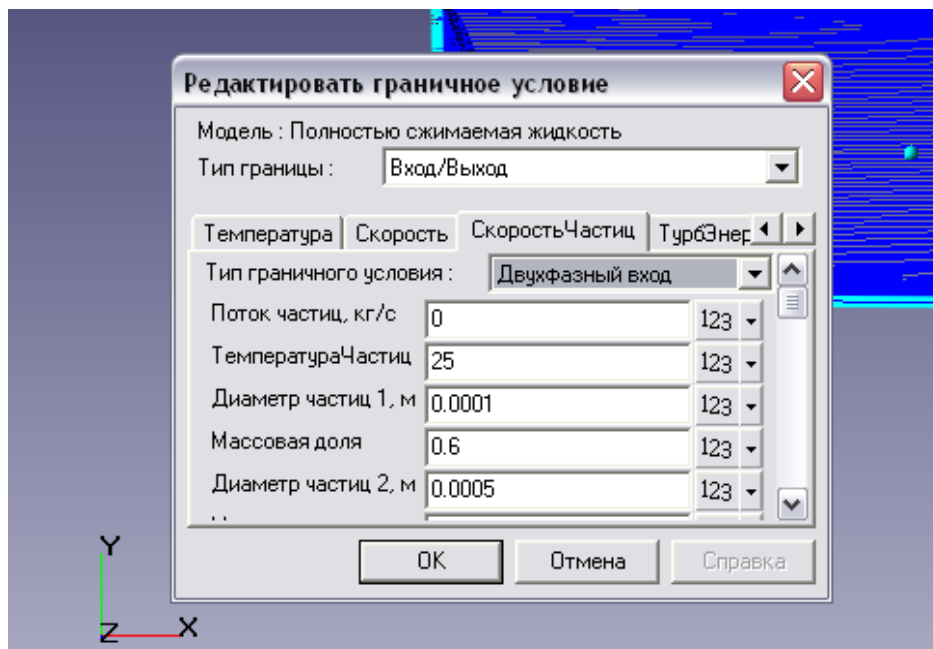
### *Визначення і завдання граничних умов*

На даному етапі визначають типи граничних умов і задають їх на конкретних поверхнях.

У моїй роботі при розрахунку варіантів щілин в цілому визначено 4 типи граничних умов:

- Вхід - вхідний перетин моделі;
- Періодика - торцеві поверхні деталі обертання утворені вирізом (сектором);
- Вихід - вихідна перетин моделі;
- Стінка - інші частини моделі.

В опції «Гр. Умови »препроцесора кожної розрахункової області, використовуючи контекстне меню опцій, створюються зазначені типи граничних умов, їх характеристики.



Малюнок 2.14 Приклад граничної умови «Вхід»

Рекомендується створити супергрупу на граничних умовах «Вхід» і «Вихід». Ця супергрупа може бути експортована в постпроцесор, як складний фасеточний об'єкт і на цьому об'єкті можуть бути побудовані шари візуалізації (наприклад заливка або характеристики). У моїй роботі на цих супергрупах будувалися такі характеристики, як: Тиск, Температура, Щільність, Повний Тиск і ін. Після того як на супергрупі створений шар характеристик, потрібно записувати всі параметри в файл \* glo, для подальшої їх обробки і аналізу. Для цього необхідно зайти в властивості характеристик і в закладці «Збереження в файл» поставити галочку на записи даних в файл і вказати шлях.

Назва	Значення
Потік маси	1 0518
Интграйт	0
Интграйт1	0
Интграйт2	-401.833
СинтСтрочкаИ	0
СинтСтрочкаУ	0
СинтСтрочкаZ	-401.833
ОбъемПлоща	0.0365495
ТочкаПривязкиИ	5.18523-014
ТочкаПривязкиУ	2.63106-008
ТочкаПривязкиZ	0.294895
Момент	0.00047305
МоментУ	0.0157088
МоментZ	0
МоментБезТрениИ	0.00047305
МоментБезТрениУ	0.0157088
МоментБезТрениZ	0
Площадь	0.0365495
сб по площади	10294.2
Интграйт	401.833
Поток массы через...	0

Малюнок 2.15 Властивості шару Характеристики

Основний необхідністю створення супергруп на вході і виході є порівняння масової витрати, що впадає в розрахункову модель і що впливає з неї. На (рисунок 2.15) наведено приклад вікна Характеристик тиску. Потік маси це наш масовий витрата. Якщо не варто знака

«-» це значить що потік втікає в робочу область. На виході в характеристиках буде стояти мінус перед потоком маси. Всі параметри відраховується щодо опорної величини.

### *Побудова і адаптація розрахункової сітки*

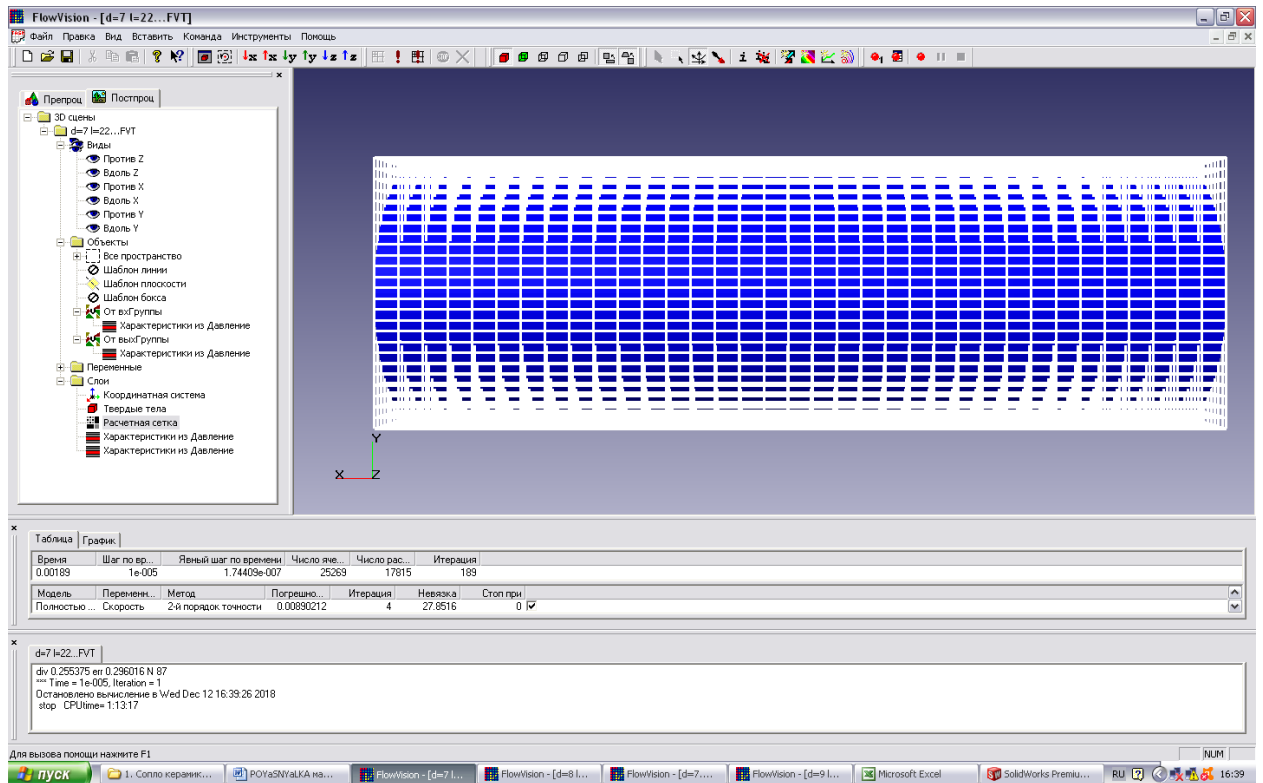
Створення починається з побудови початкової сітки. На цьому етапі вводяться ряд параметрів, що характеризують розмір майбутньої сітки (осередків) в діалоговому вікні «Початкова сітка» (малюнок 2.16).

Побудова якісної розрахункової сітки - відповідальність етап створення розрахункової моделі.

Далі в графічному вікні з'являється результат - розрахункова сітка, яка буде згенеровано програмою перед початком розрахунку. Діалог побудови



розрахункової сітки (розрахункових осередків) дозволяє як будувати останні з рівномірним кроком, так і за допомогою команди «Вставити» дробити виділений інтервал.

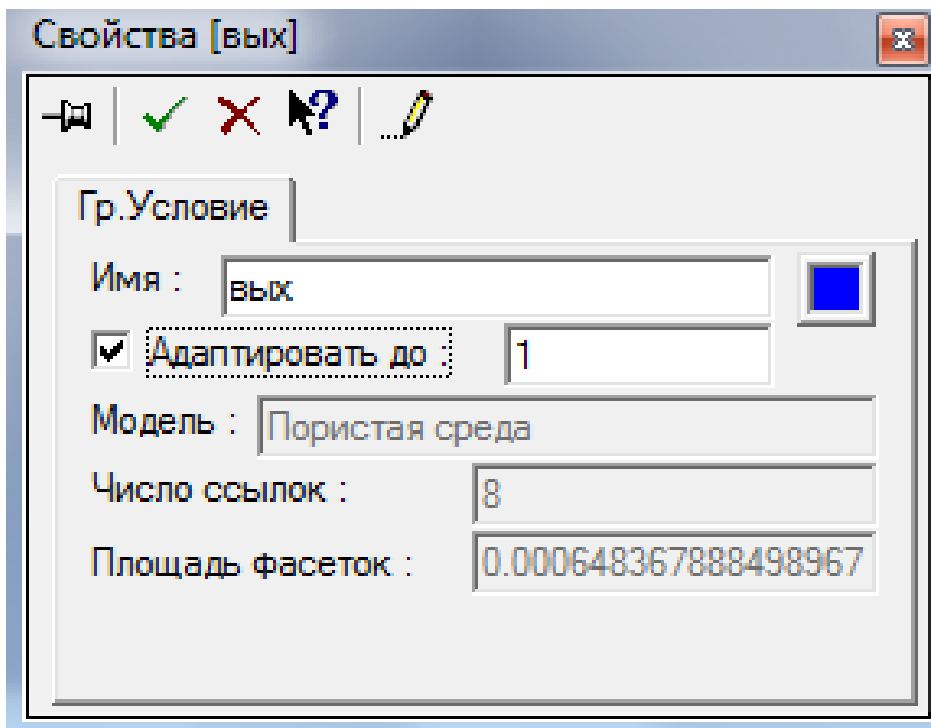


Малюнок 2.16 Побудова розрахункової сітки початкового рівня

Наступний етап - уточнення розрахункової сітки - пов'язаний з процесом адаптації початкових розрахункових осередків. Суть адаптації полягає в подрібненні осередків в тих областях, де передбачається, що початкова сітка є грубою і адекватно не відображає зміни, що відбуваються фізичних параметрів.

Для адаптації розрахункових осередків досить в діалоговому вікні граничних умов, що відносяться до даної поверхні, задати рівень адаптації (рисунок 2.17). У наведеному на малюнку прикладі, заданий 1-й рівень адаптації. Це означає, що кожна клітинка початкового рівня, буде розбита на чотири осередки з розмірами, що залишають половину вихідних. Таким чином, сформується шар осередків першого рівня. Якщо заданий 2-й рівень, то в цьому шарі будуть виділені ті осередки, які прилягають до зазначеної

поверхні, і кожна з них знову буде піддана операції дроблення на чотири однакових осередки. В результаті буде сформований шар осередків другого рівня.



Малюнок 2.17 Завдання рівня адаптації осередків

#### Завдання загальних параметрів розрахунку

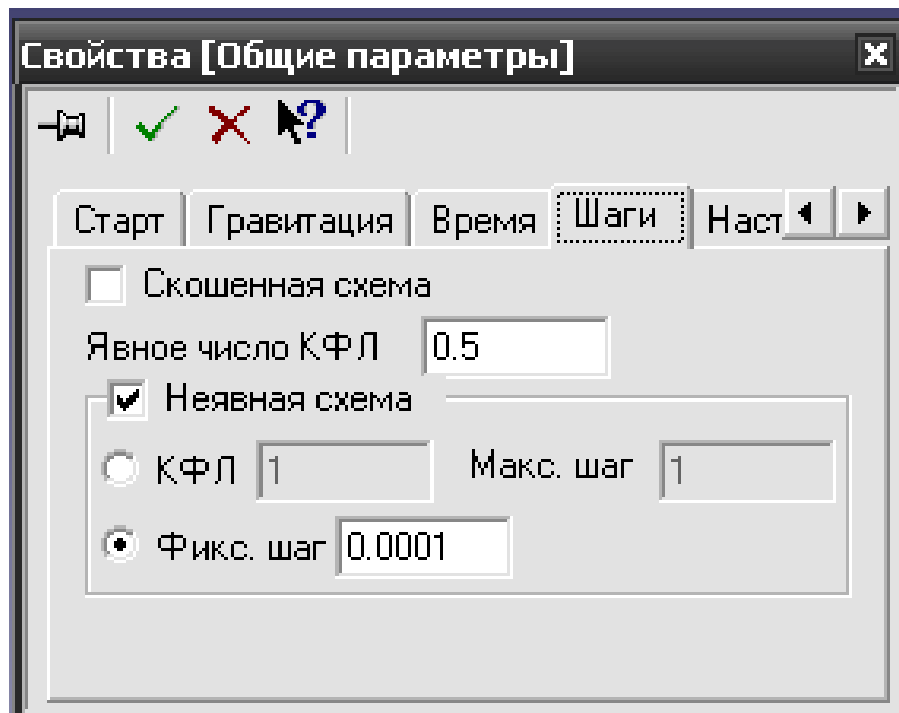
Заключним етапом у підготовці завдання є завдання загальних параметрів у відповідному діалоговому вікні (властивості опції «Загальні параметри»). В цьому вікні задаються умови початку розрахунку (закладка «Старт»).

Здається час інтегрування і величина кроку інтегрування за часом (рисунок 2.18). При цьому крок за часом в може бути заданий як постійним, так і визначений за допомогою умови Куранта-Фрідрікса-Леві.

Рекомендації по кроку інтегрування наступні: крок інтегрування можна задавати рівним 1/10 прогонової часу частинки.

КФЛ - це відношення кроку інтегрування до явного кроку за часом. Тому можна ставити спочатку КФЛ рівним 10 і максимальний крок раз в 100 більше ніж явний крок за часом. Чим більше крок за часом тим швидше зійдеться стаціонарний процес, але тим швидше розвалиться нестационарний процес. Тому на початку розрахунку необхідно встановлювати невеликий

крок за часом, раз в 5-10 більше явного кроку за часом. Якщо видно що процес починає сходитися, можна протягом розрахунку потроху збільшувати КФЛ, тим самим збільшувати крок інтегрування. Рекомендацій по вибору фіксованого кроку як таких немає, але він не повинен бути занадто маленьким - тому що час розрахунку різко збільшується, але і не повинен бути занадто великим, тому що існує ймовірність розвалу рішення. Тому його потрібно приймати раз в 10-30 більше явного кроку.



Малюнок 2.18 Завдання кроку інтегрування

Після того як побудована завдання, можна переходити до вирішення. Перед початком вирішення програма виробляє побудова початкової розрахункової сітки, а, починаючи з першої ітерації - запускає заданий користувачем процес адаптації.

В ході розрахунку можна спостерігати і контролювати всі його аспекти (побудова розрахункової сітки, збіжність процесу розрахунку, результати розрахунку і їх аналіз).

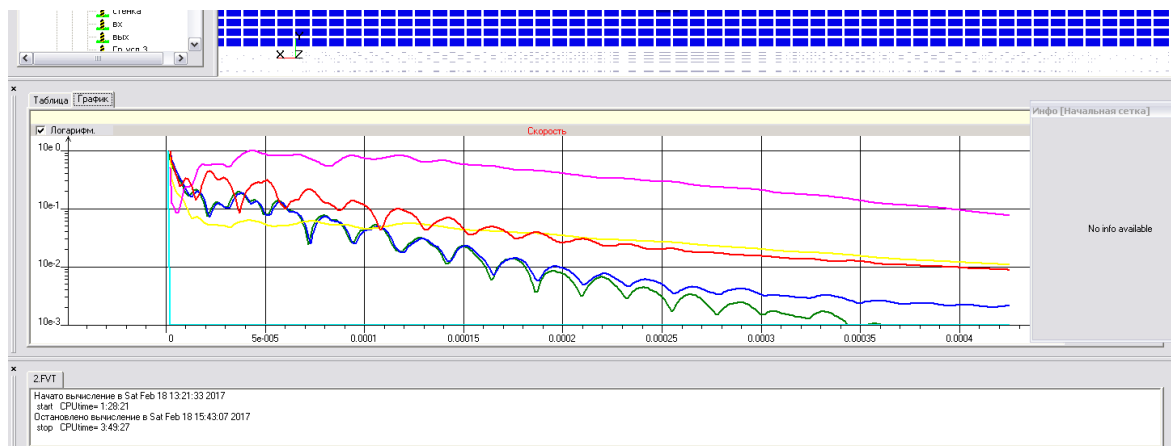
У верхній частині вікна помилок (рисунок 2.19) представлена інформація про поточний момент часу, крок інтегрування за часом, загальне і розрахункова кількість осередків, а також номер поточної ітерації за часом.

У нижній частині, в таблиці наведені назву розрахункових моделей, повний перелік вирішуваних рівнянь для кожної розрахункової області, методи вирішення, досягнуті похибки на ітераціях по простору, кількість цих ітерацій, величина невязки і умови зупинки розрахунку.

Модель	Типовий	Метод	Помилка	Ітерації	Умови	Статус
Розв'язок	Скорість	2-й порядок точності	5.82025e-01	0	max	0 SP
Розв'язок	Давлення	2-й порядок точності	0.00764134	21	max	0 SP
Розв'язок	Зв'язальні	2-й порядок точності	0.00118897	7	max	0 SP
Розв'язок	Турбулент	2-й порядок точності	0.00172676	8	max	0 SP
Розв'язок	Турбулент	2-й порядок точності	0.00425726	8	max	0 SP
Розв'язок	Питома	СДМ	0.00286177	1	max	0 SP
Розв'язок	Скорість	2-й порядок точності	0.00286133	5	max	0 SP
Розв'язок	Давлення	2-й порядок точності	0.00764134	21	max	0 SP
Розв'язок	Зв'язальні	2-й порядок точності	0.00118897	7	max	0 SP
Розв'язок	Турбулент	2-й порядок точності	0.00172676	8	max	0 SP
Розв'язок	Турбулент	2-й порядок точності	0.00425726	8	max	0 SP
Розв'язок	Питома	СДМ	0.00286133	3	max	0 SP

Малюнок 2.19 Вікно «Помилки», закладка Таблица

Кінець розрахунку визначається збіжністю всіх розв'язуваних рівнянь (рисунок 2.20)

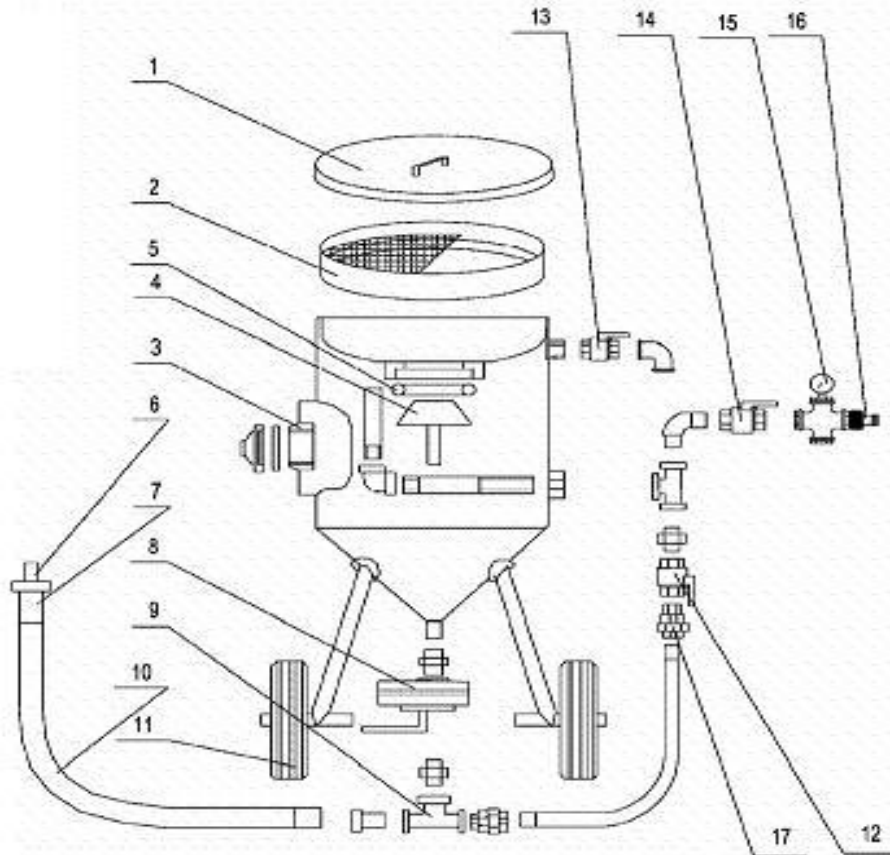


Малюнок 2.20 Вікно «Помилки», закладка Графік

Іноді графік тривалий час не сходиться. Це не так важливо. Головним критерієм встановлення стаціонарного режиму течії в компресорі, а значить і завершення розрахунку є рівність масових витрат газу на вході і на виході з щілини.

## 2.3 МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

Експериментальні дослідження проводилися на випробувальній установці, схема якої наведена на малюнку 3.1.



Малюнок 3.1 Схема піскоструминної установки:

- 1 – кришка;
- 2 – сито;
- 3 – люк;
- 4 – конус запорний;
- 5 – кільце запорне;
- 6 – кільце абразивоструйне;
- 7 – соплотримач;
- 8 – затвор пісчаний;
- 9 – трійник;
- 10 – рукав;
- 11 – колеса;
- 12 – клапан повітряний;
- 13 – клапан спускний;
- 14 – клапан ввідний;
- 15 – манометр;
- 16 – з'єднання повітряне;
- 17 - з'єднання швидкоз'ємне.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 06.00.00.00. ПЗ

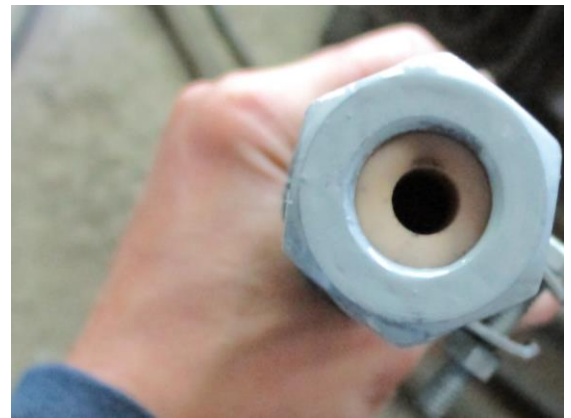
Лист

46

Через кришку 1 та сито 2 піскоструминна установка наповнюється абразивним матеріалом, який чере трійник 8 по рукаву 10 подається в соплотримач 7 де встановлений досліджуваний піскоструминний ежектор (малюнок 3.2).



а)



б)

Малюнок 3.2 прямоточний ежектор: а) піскоструменеве сопло;  
б) піскоструменеве сопло в тримачі

Нижче наведено фото експериментальної установки (малюнок 3.3).



а)



б)

Малюнок 3.3 Фото пісокструменевої установки

а) пісокструменевий апарат;

б) установка в комплектності з джерелом стиснутого повітря

Методика вимірювань і обробки дослідних даних

В якості представлених характеристик пісокструминного ежектора використовувалися величина витрат протікання  $m$  в натуральному вимірі і його умовний коефіцієнт витрати.

Дійсна витрата визначається за формулою:

$$m = \frac{V_2 - V_1}{\tau \cdot \rho_1} \cdot 60 \quad \text{кг/с}, \quad (3.1)$$

Де  $V_1$  і  $V_2$  – початковий і кінцевий показання лічильника,  $\text{л}^3 / \text{л} \text{с}^{-1}$ ;

$\tau$  – час вимірювання, с;

$$\rho_1 = \frac{\delta_1}{R_0} \quad \text{– щільність повітря на вході в сопло, } \text{кг/л}^3.$$

Оскільки не існує точного теоретичного рішення задачі про величину теоретичної витрати, в якості останнього прийнято вираз за формулою

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КМ 06.00.00.00. ПЗ	48

А. Стодоли (3.2) і в якості безрозмірної характеристики прийнятий умовний коефіцієнт витрати, який визначається як:

$$\mu_{\delta} = \frac{m}{m_{\delta\delta}} = \frac{m}{D \cdot s \sqrt{\frac{1 + p_2 / p_1}{z}} \cdot \sqrt{(p_1 - p_2) \cdot \rho_1}} \quad (3.2)$$

Для отримання витратних характеристик ежектора за результатами експериментального дослідження була проведена обробка за такими залежностями:

Абсолютний тиск на вході в ежектор, Па:

$$p_{\delta\delta} = \delta_{\delta\delta i} + \delta_{i\delta\delta\delta}, \quad (3.3)$$

Где  $p_{\delta\delta i}$  – барометричний тиск;

$\delta_{i\delta\delta\delta}$  – показання водяних манометрів, які враховують втрати тиску при проходженні потоком арматури стенду, газового лічильника, системи очищення повітря.

Барометричний тиск, Па:

$$p_{\text{атм}} = 133,32 \cdot B \quad (3.4)$$

Де  $B$  – показання барометра - анероїда, мм. рт. ст.

Об'ємна витрата повітря проходячого через ежектор  $\dot{V} / \delta\delta$ :

$$\dot{V}_y = \frac{Q_2 - Q_1}{\tau}, \quad (3.5)$$

Де  $Q_1$  і  $Q_2$  – показання ротаційного лічильника за проміжок часу  $\tau$ .

Масова витрата повітря, кг/с:

$$\dot{m}_y = \rho_1 \cdot \dot{V}_c, \quad (3.6)$$

де  $\rho_1$  – щільність повітря безпосередньо перед ежектором;

$$\rho_1 = \frac{p_1}{R \cdot T_1}, \quad (3.7)$$

де  $p_1$  – тиск перед ежектором;

$R = 287$  Дж / (кг · К) - газова стала повітря;

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



$\dot{Q}_1$  – температура перед ежектором.

Колова швидкість вала, об / хв:

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (3.8)$$

Статичний тиск в ежекторі:

$$p_i = p_{атм.} + p_{надл.} \quad (3.9)$$

Перелік вимірюваних показників можуть відрізнятися, вимірювальні прилади і їх характеристики наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Похибки прямих та непрямих вимірювання

Параметр	Розмірність	Номинальна величина	Похибки	
			Абсолютна	Відносна, %
Прямі вимірювання				
B	мм. рт. ст.	750	±0,5	0,001
H	мм. вод. ст.	550 - 2000	±3	0,0018-0,0005
$Q_{PG-40}$	$м^3 / ч$	(0,2–1,2) 40	-	1,5-2,5
$Q_{PG-250}$	$м^3 / ч$	(0,1–0,2) 250	-	2
$\tau$	с	60	±0,2	0,0033
Непрямі вимірювання				
$p_{абс}$	Па	103000 - 122000	±72,5	0,04
$\rho$	$кг / м^3$	1,27 - 1,5	±0,048	3,5
$V_y$	$м^3 / мин$	0,46 - 1,5	±0,011 -0,033	2,36 - 2,2
$m_{y(PG-40)}$	кг/с	0,009 - 0,019	±0,00022	1,8
$m_{y(PG-250)}$	кг/с	0,019 - 0,032	±0,0021	4,7

## Визначення похибок прямих і непрямих вимірювань

В роботі нас цікавлять значення похибки вимірювань дійсного витрати, тисків і температур перед газовим лічильником і безпосередньо у вхідному перетині ежектора. Основна величина  $\dot{m}$ , яка визначається в роботі, є результат опосередкованих вимірювань, яка визначається за відомим розрахунковим формулами, при одноразовому прямому вимірі величин. Похибки результатів прямих вимірювань складаються з систематичних і випадкових помилок. Систематичні помилки постійні за величиною і не залежать від вимірюваної величини.

Випадкові помилки відбуваються в результаті впливу багатьох випадкових факторів, які виявити і усунути неможливо. Їх вплив на результат враховується за допомогою методів теорії ймовірності.

Відносна похибка непрямого вимірювання:

$$\varepsilon_y = \frac{\delta y}{y} \quad (3.10)$$

або, якщо  $y = y(x_1, x_2, \dots, \tilde{\sigma}_n)$

$$\varepsilon_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial}{\partial x_i} \ln y \right)^2 \cdot (\delta x_i)^2} \quad (3.11)$$

Розрахункова формула для визначення відносної похибки масової витрати повітря через ущільнення  $\dot{m}$  має вигляд:

$$\delta \dot{m} = \pm 100 \sqrt{\left( \frac{\delta \Delta V}{\Delta \bar{V}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \Delta \tau}{\Delta \bar{\tau}} \right)^2 + \left( \frac{\delta p_{вс}}{\Delta \bar{p}_{вс}} \right)^2 + \left( \frac{\delta T_{вс}}{\Delta \bar{T}_{вс}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta B}{B} \right)^2} \quad (3.12)$$

Розрахунки показали, що величина середньоквадратичної похибки вимірювання  $\delta \dot{m}$  не перевищує 1,8% при вимірюванні величини об'ємного витрати лічильником РГ - 40 і 4,7% для РГ – 250 що є приємлемим.

## Висновки за розділом 2

В даному розділі описані методи чисельного та експериментального дослідження ежектора.

Виконаний аналіз існуючих проблем при моделюванні двофазного середовища.

Описана методика адаптації програмного комплексу FlowVision до вирішення поставлених задач.

Описана конструкція та принцип роботи експериментальної ежекторно-очисної установки.

Висвітлена методика проведення прямих та непрямих вимірювань.

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		53

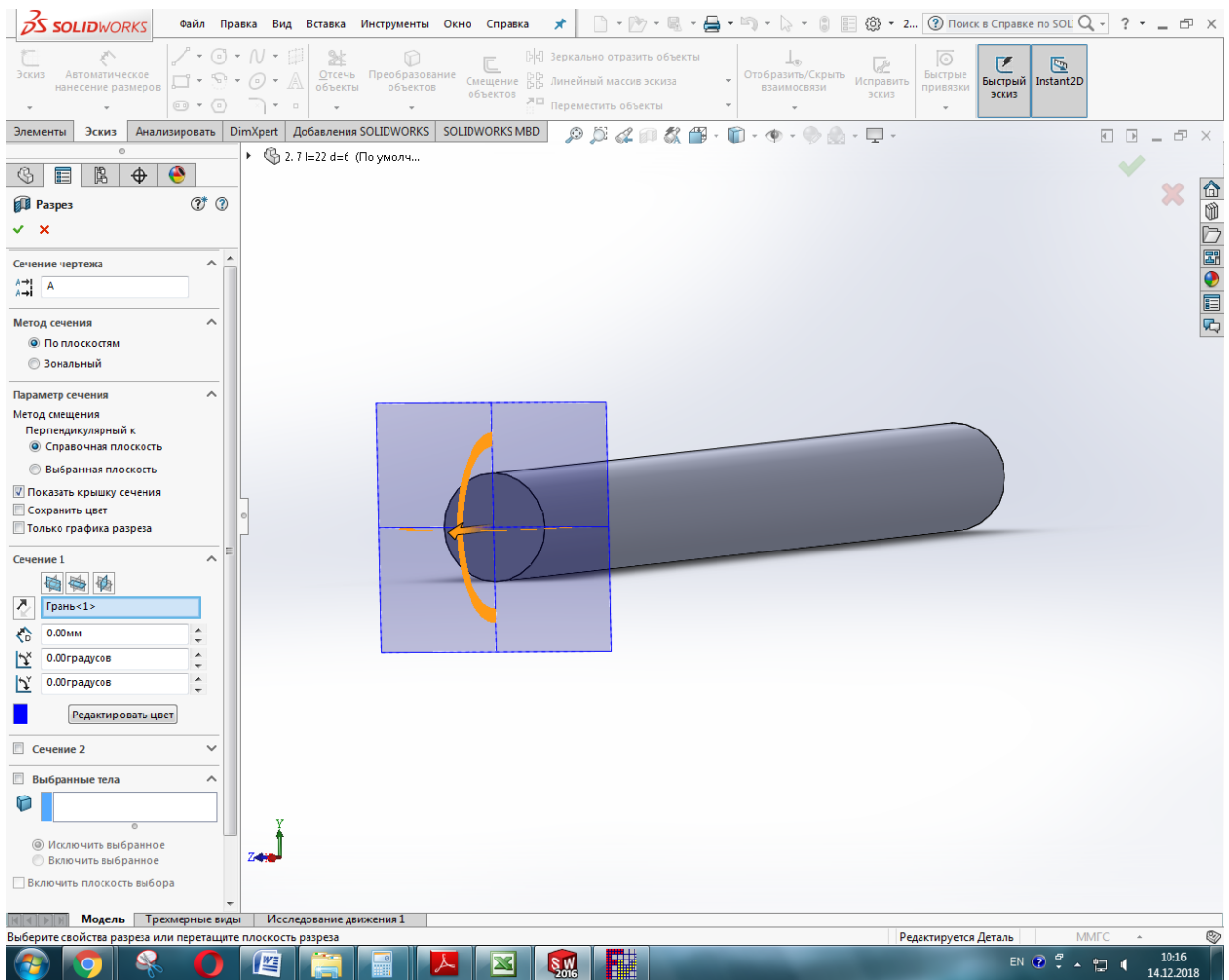
### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 3.1 Дослідження циліндричного сопла

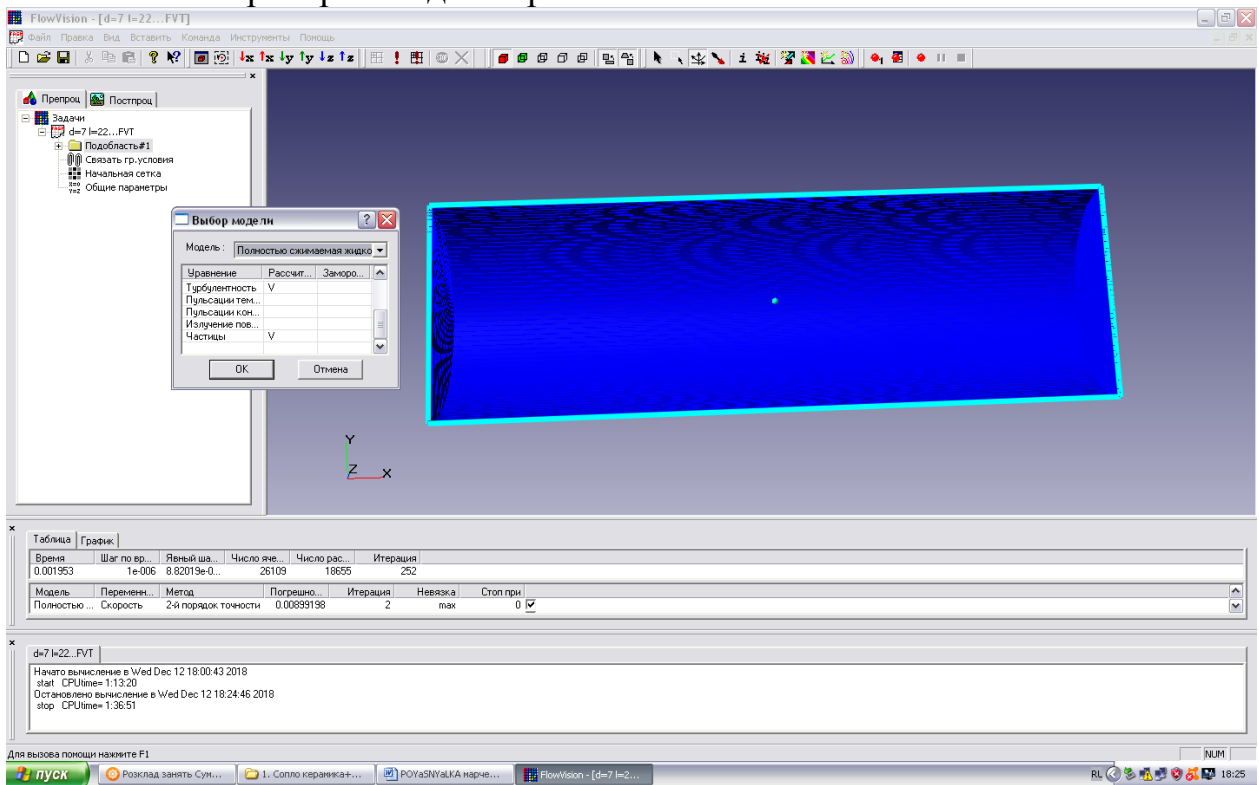
Виконано чисельне дослідження проточної частини циліндричного сопла з діаметром  $d$ , та довжиною  $l$  з використанням програмного комплексу FlowVision. На малюнку 3.1 представлена 3D модель проточної частини сопла, нижче розрахункову модель (малюнок 3.2) та розрахункова сітка (малюнок 3.3). Модель течії – повністю стискаєма рідина з активацією двухфазного середовища (опцією частинки). Абразивні частинки мають діаметри, що коливаються в діапазоні 0,0001–0,001м. Число розрахункових ячілок 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).

Звичайне циліндричне сопло досліджувалося для встановлення особливостей протікання двухфазного середовища з метою пошуку резервів по підвищенню його ефективності.

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		54



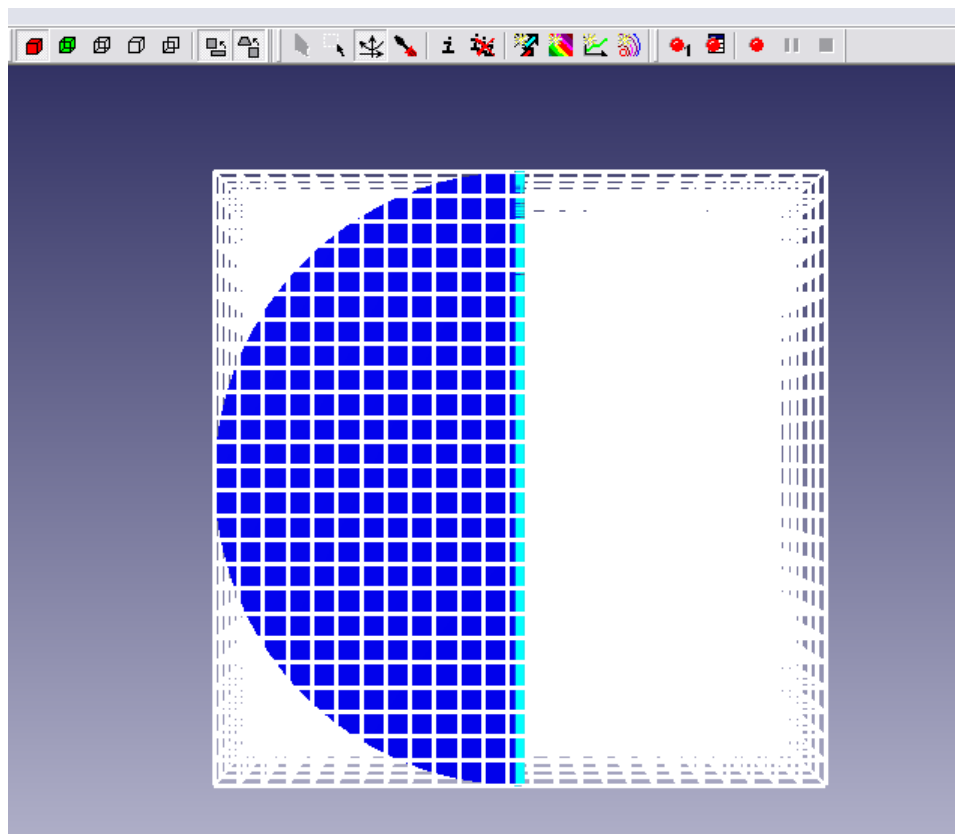
Малюнок 3.1 Тримірна модель проточної частини сопла



Малюнок 3.2 Розрахункова модель

										Лист
										55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

КМ 06.00.00.00. ПЗ

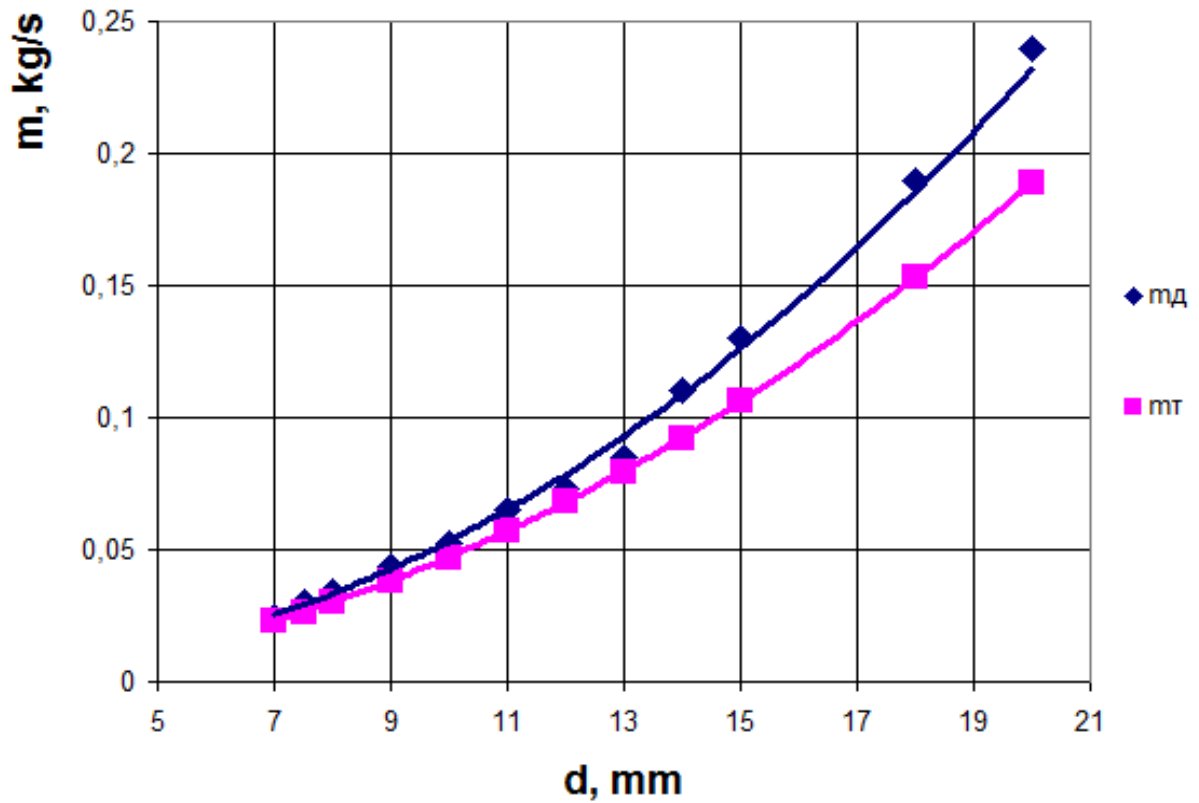


Малюнок 3.3 Розрахункова сітка

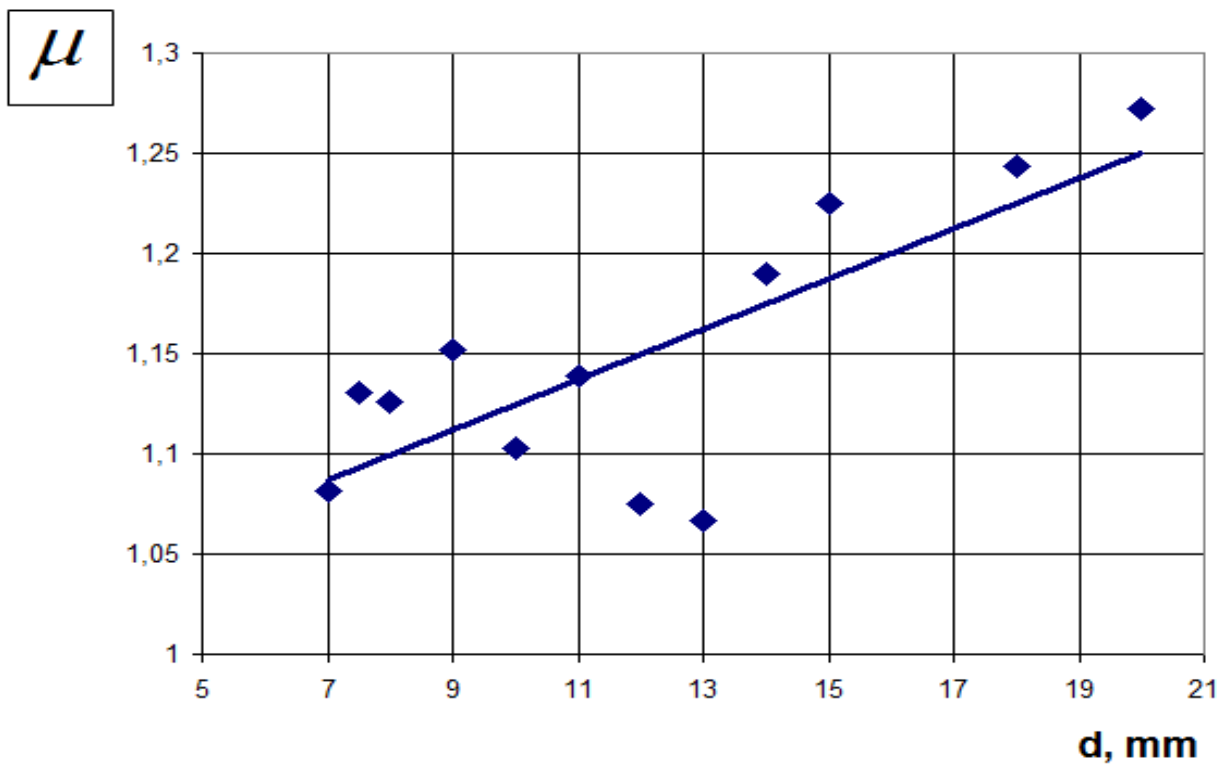
Головним параметром сопла є величина його внутрішнього діаметру  $d$ . Виконана серія чисельних розрахунків для встановлення значимості впливу параметру  $d$  на величину дійсної та теоретичної витрати.

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)



б)

Малюнок 3.4 Характеристики сопла

а) масва витрати суміші б) коефіцієнт витрати

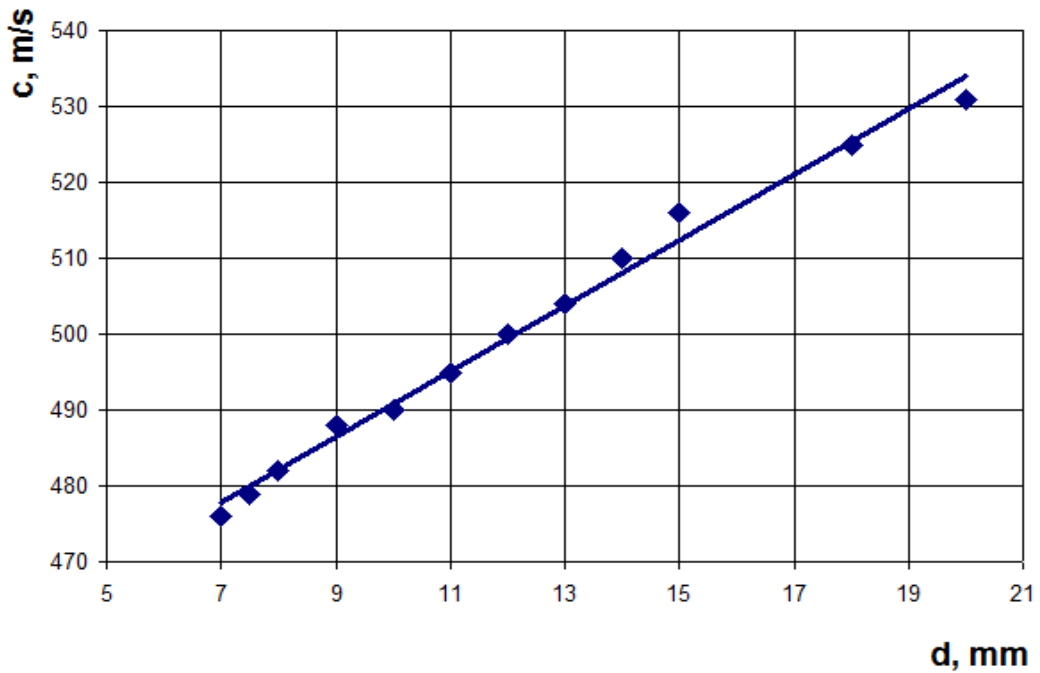
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КМ 06.00.00.00. ПЗ

Лист

57

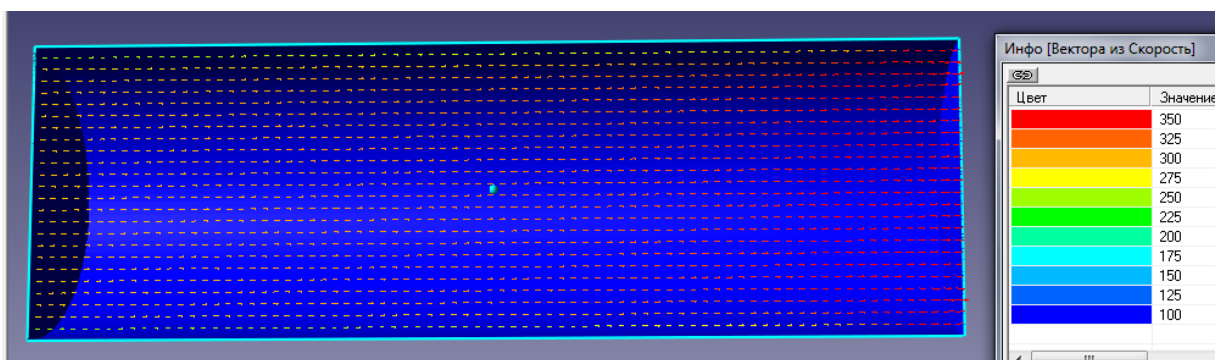
З отриманих залежностей (малюнок 3.4, 3.5) очевидна тенденція до збільшення значення коефіцієнта витрати повітряно-абразивної суміші сопла та його витратної швидкості зі збільшенням його внутрішнього діаметру при сталих значеннях вхідних та вихідних параметрів  $p_1$ ,  $p_2$ .



Малюнок 3.5 Вплив діаметра сопла на значення витратної швидкості  $c$

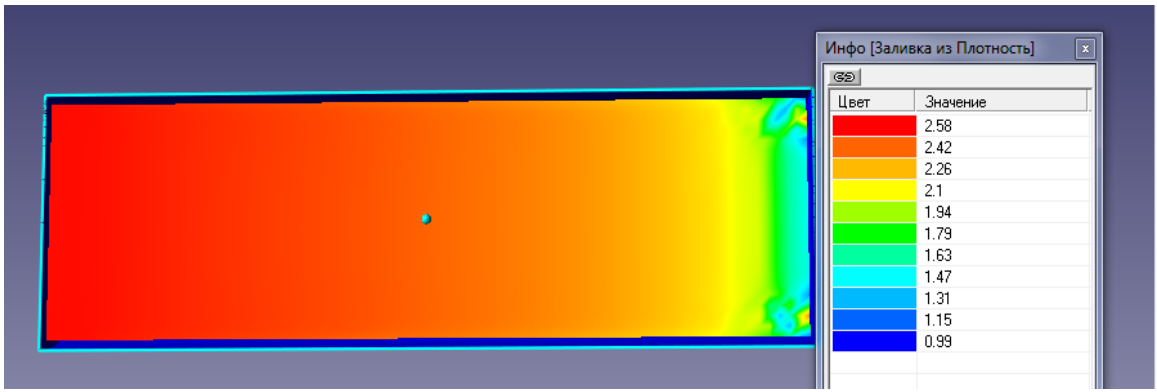
Слід зауважити, що при збільшенні прохідного перетину сопла в два рази, величина витрати через нього збільшується в 4.5 рази.

Нижче на малюнку 3.6, 3.7 наведені деякі візуалізації течії

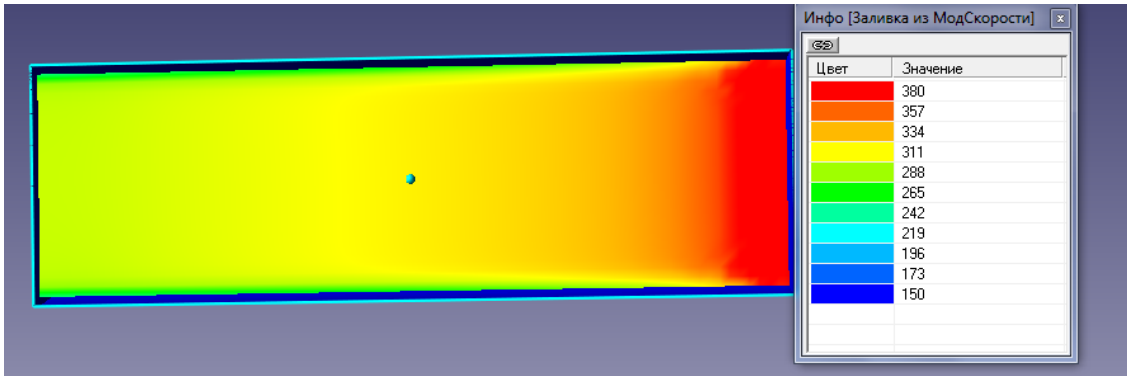


а)

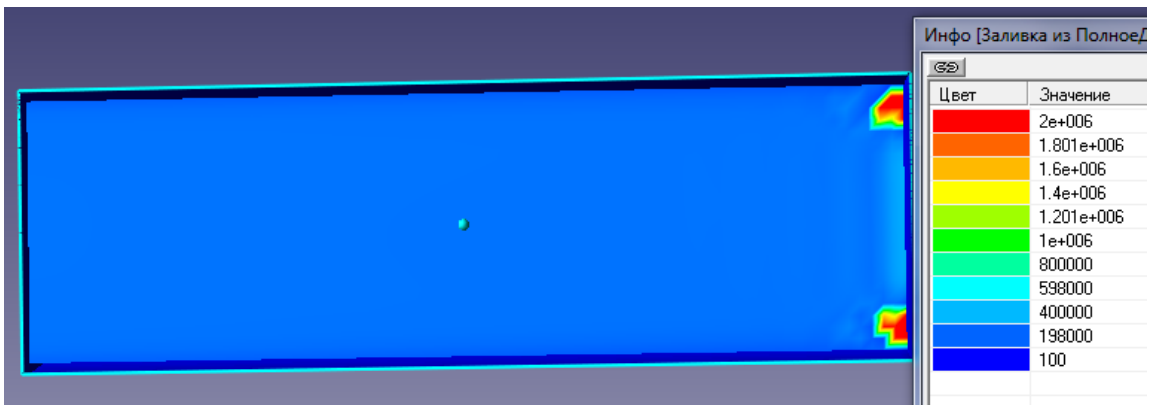




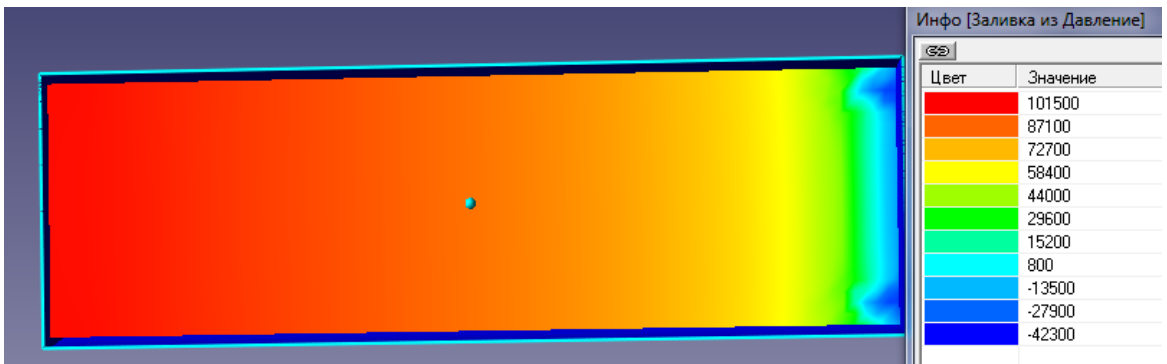
б)



в)



г)



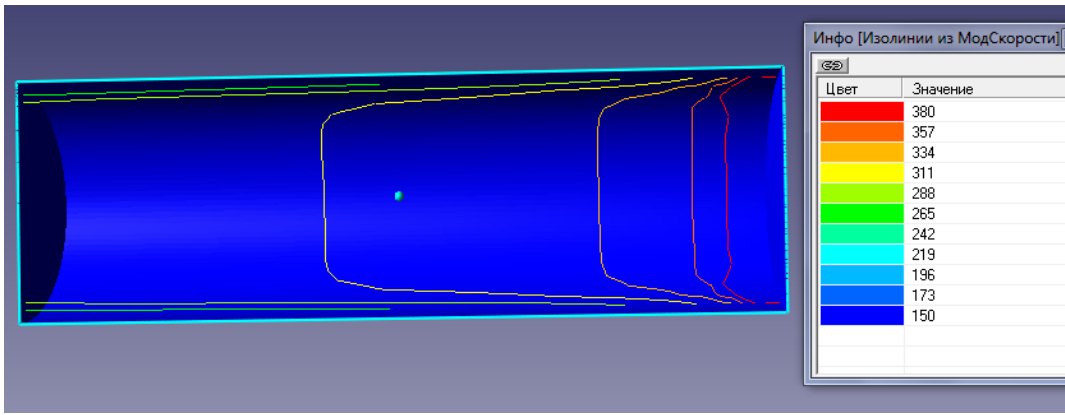
д)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

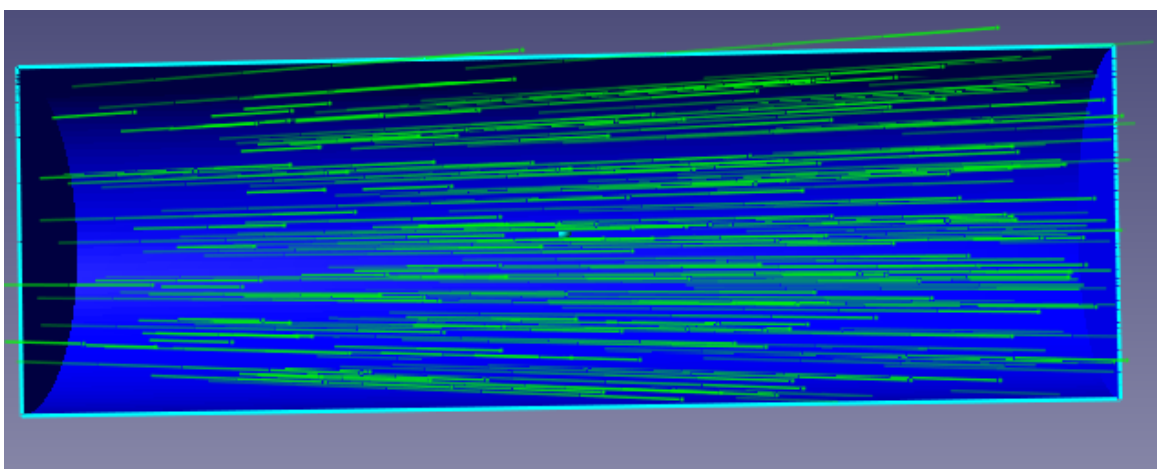
КМ 06.00.00.00. ПЗ

Лист

59



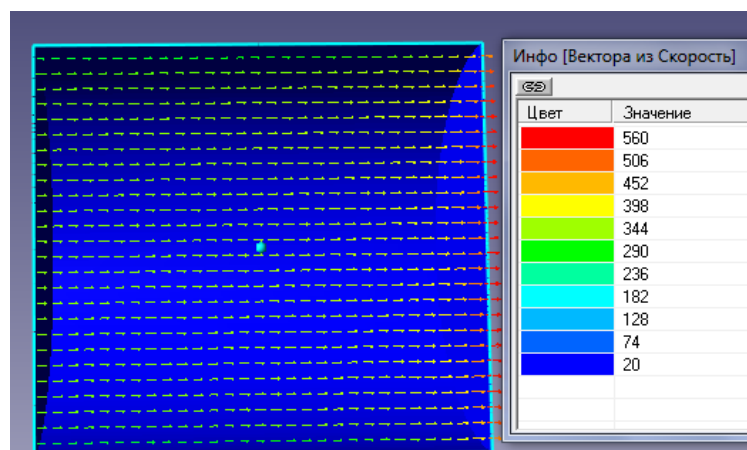
е)



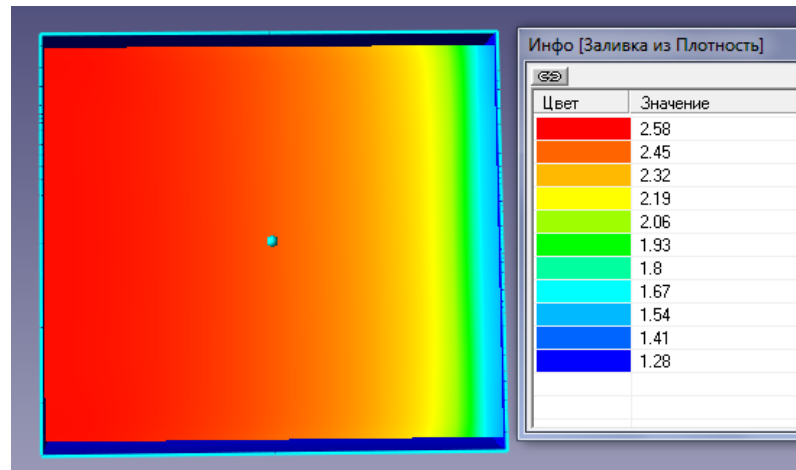
ж)

Малюнок 3.6 Візуалізації течії ( $d=7\text{мм}$ ,  $l=22\text{мм}$ ,  $p1/p2=1,99$ ):

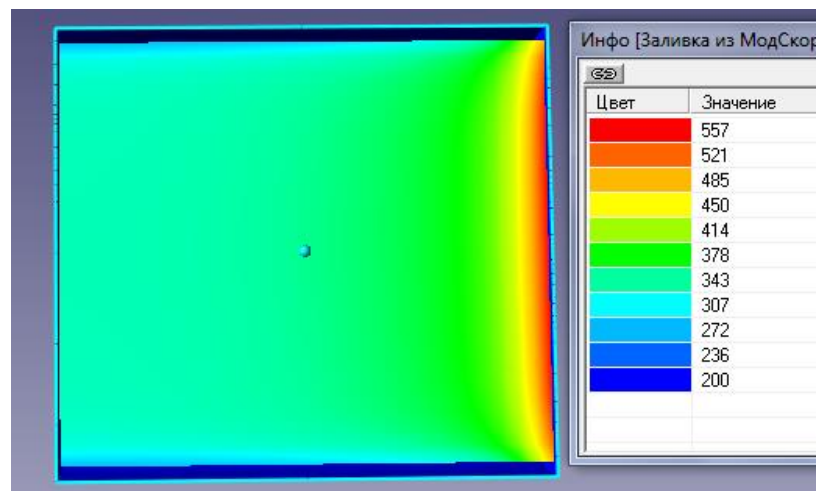
- а) вектора із швидкості; б) густина потоку; в) модуль швидкості;  
 г) повний тиск; д) статичний тиск; е) ізолінії з модуля швидкості; ж) спалах швидкості.



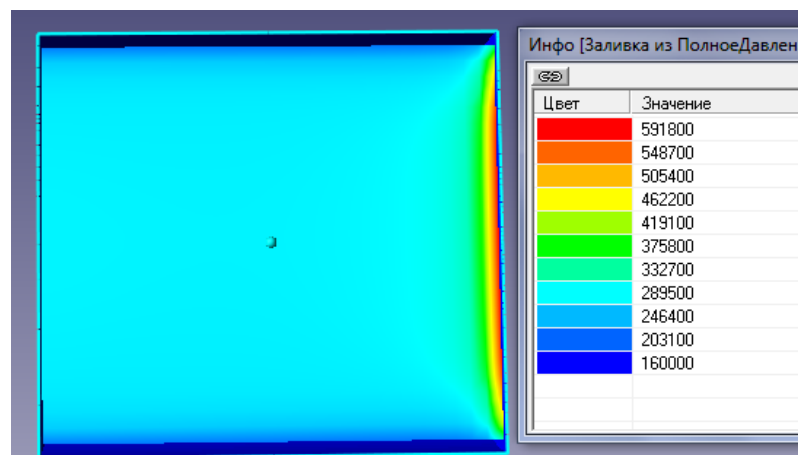
а)



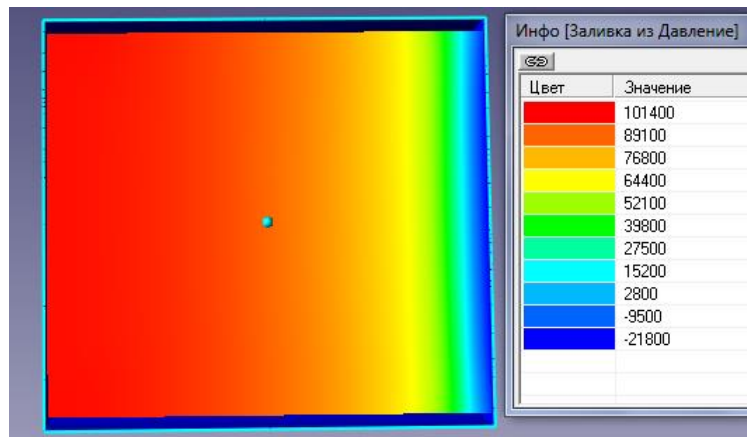
б)



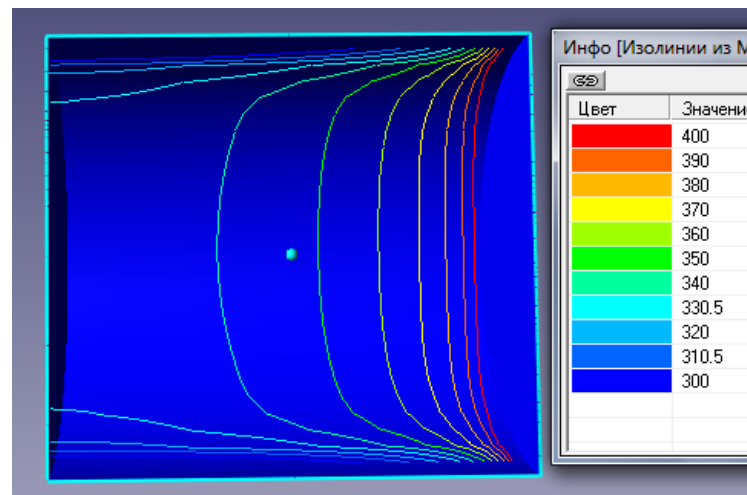
в)



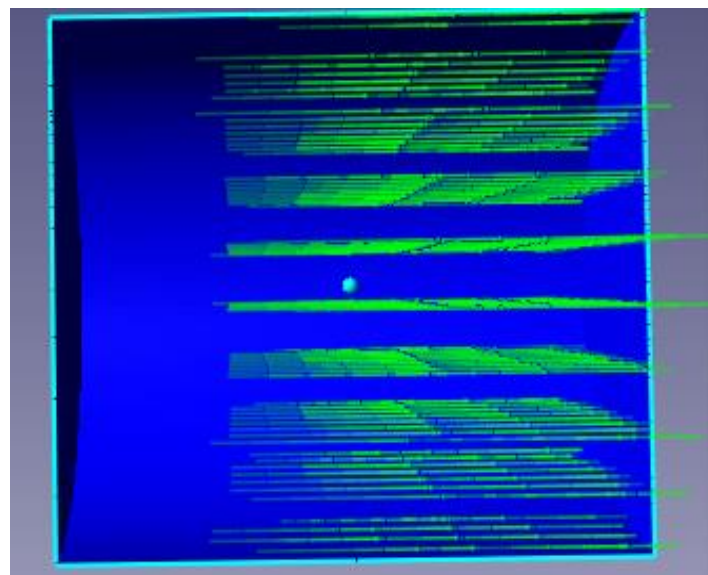
г)



д)



е)



ж)

Малюнок 3.7 Візуалізації течії ( $d=20\text{мм}$ ,  $l=22\text{мм}$ ,  $p_1/p_2=1,99$ ):  
 а) вектора із швидкості; б) густина потоку; в) модуль швидкості;  
 г) повний тиск; д) статичний тиск; е) ізолінії з модуля швидкості; ж) спалах швидкості.

Звертає на себе увагу відмінність в структурі течії робочого потоку в соплах з різними значеннями внутрішнього діаметру  $d=7\text{мм}$  та  $d=20\text{мм}$ . При  $d=7\text{мм}$  маємо чітку нерівномірність параметрів потоку на виході з сопла, чого немає на малюнку 3.7 в силу збільшення прохідного перетину  $d$ . Візуалізації течії показують різке підвищення параметрів течії в вихідному перетині сопла. Данне явище не має місця при витіканні однофазного середовища.

На (малюку 3.6, 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  $d$ .

Таблиця 3.4. Результати експериментальних досліджень

№ п/п	Межа надлишкового тиску повітря в ресивері, кгс/см.кв.	Час витоку, с		Витрата повітря, м.куб/с
		Кш=0	Кш=1	
1	6-5,8	6	9	0,0096
2	5,8-5,6	6	9	0,0096
3	5,6-5,4	6	9	0,00778
4	5,4-5,2	7	8,8	0,00778
5	5,2-5	7	8,5	0,00778
6	5-4,8	7	8,8	0,00677
7	4,8-4,6	8	9,6	0,00677
8	4,6-4,4	8	9,9	0,0063
9	4,4-4,2	9	10	0,0056
10	4,2-4	10	12	0,00496
11	4-3,8	11	12	0,00496
12	3,8-3,6	11	12	0,00457
13	3,6-3,4	12	13	0,00457
14	3,4-3,2	13	15	0,00431
15	3,2-3	15	18	0,00365
16	3-2,8	16	20	0,00344

17	2,8-2,6	16	20	0,00339
18	2,6-2,4	17	21	0,00319
19	2,4-2,2	19	20	0,00285
20	2,2-2	20	23	0,00278
21	2-1,8	22	23,5	0,00246
22	1,8-1,6	25	30	0,00220
23	1,6-1,4	27	33	0,00227
24	1,4-1,2	30	38	0,00188

Таблиця 3.5. Середня швидкість потоку на виході із сопла при різних діаметрах зони розгону

№ п.п	Діаметр зони розгону, мм	Швидкість Ansys, м/с		Швидкість FlowVision, м/с	
		Кш=0	Кш=1	Кш=0	Кш=1
1	6 (без зносу)	603	570	605	573
2	7	581	561	585	542
3	8	551	500	555	512
4	9	519	480	523	494
5	10	483	438	487	425
6	11	436	398	440	388
7	12	300	267	306	277

З таблиць (3.1 – 3.5) видно що шорсткість поверхні сопла впливає на його характеристики при роботі з абразивним матеріалом дл 30 % в той час, коли без абразиву вплив несуттєвий ( до 7 %) при умовах мавши місце в дослідах.

Таблиця 3.6 – Результати Експериментального дослідження роботи циліндричного сопла

№ п/п	Тиск повітря основного потоку, МПа	Час оброблення, с	Переважаючий фракційний склад абразиву, мм	Шорсткість обробленої ділянки поверхні Ra, мкм	Шорсткість необробленої ділянки поверхні Ra, мкм
1	0,2	210	від 0,2 до 0,5	26	50
2	0,25	200	від 0,2 до 0,5	24	50
3	0,3	188	від 0,2 до 0,5	21	50
4	0,35	175	від 0,2 до 0,5	20	50
5	0,4	159	від 0,2 до 0,5	18	50
6	0,45	130	від 0,2 до 0,5	16	50
7	0,5	120	від 0,2 до 0,5	13	50
8	0,55	115	від 0,2 до 0,5	11	50
9	0,6	105	від 0,2 до 0,5	9	50
10	0,65	80	від 0,2 до 0,5	8	50
11	0,7	51	від 0,1 до 0,2	15	35
12	0,75	56	від 0,1 до 0,2	14	35
13	0,8	40	від 0,1 до 0,2	12	35
14	0,85	30	від 0,1 до 0,2	10	35
15	0,9	25	від 0,1 до 0,2	9	35
16	0,95	23	від 0,1 до 0,2	8	35
17	1	20	від 0,1 до 0,2	7	35

В табл. 3.6 наведено результати оброблення 17 ділянок поверхні забруднених металевих пластин абразивоструменевим обробленням при різних технологічних режимах та методом описаним вище визначена отримана шорсткість поверхонь

Встановлення залежності стану поверхні від технологічних режимів абразивоструменевого оброблення деталей ливарного виробництва. Залежність параметра шорсткості Ra від дослідних факторів: тиску повітря основного потоку P , середнього розміру фракції абразивних частинок d абраз , часу абразивоструменевого оброблення поверхні деталі t буде мати вигляд (3.1):

$$Ra = C_R \cdot P^{\alpha_1} \cdot d_{\text{абраз}}^{\alpha_2} \cdot t^{\alpha_3},$$

де  $P$ ,  $d_{\text{абраз}}$ ,  $t$  – змінні фактори, відповідно, тиск повітря потоку, розмір фракції абразиву та час абразивоструменевого оброблення;

$C_R$  – коефіцієнт, що враховує сумарний вплив неврахованих у рівнянні факторів;

$\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  – показники степенів при змінних факторах.

Завданням експерименту є встановлення значень коефіцієнта  $C_R$  і

показників степенів  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  при змінних факторах  $P$ ,  $d_{\text{абраз}}$ ,  $t$ . [16]

Для цього рівняння (3.1) шляхом логарифмування варто привести в більш простий вигляд рівняння лінійної регресії, яке для 3-факторного експерименту матиме вигляд:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3, \quad (3.2)$$

де  $y = \lg Ra$  – логарифмічне відображення параметру  $Ra$  (відклик моделі);

$x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  – змінні фактори в закодованому вигляді, що відповідають параметрам  $P$ ,  $d_{\text{абраз}}$ ,  $t$  відповідно;

$b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$  – коефіцієнти регресії при змінних факторах, що є оцінкою їх важливості;

$b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  – коефіцієнти регресії, що враховують важливість взаємного впливу змінних факторів на дослідний процес.

Кодування змінних факторів  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  в рівнянні регресії (3.2)

здійснюється наступними залежностями:

					КМ 06.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата		66



$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg P - \lg P_{\max})}{\lg P_{\max} - \lg P_{\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg d_{\text{образ}} - \lg d_{\text{образmax}})}{\lg d_{\text{образmax}} - \lg d_{\text{образmin}}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg t_{\max})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}} + 1, \end{aligned} \right\},$$

де  $P$ ,  $d_{\text{образ}}$ ,  $t$  відповідають максимальним їх значенням,  $P_{\min}$ ,  $d_{\text{образmin}}$ ,  $t_{\min}$  – мінімальним значенням змінних факторів при проведенні досліджень в граничних точках області експериментування.

Після знаходження коефіцієнтів регресії  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ ,  $b_{123}$  в рівнянні (3.2) здійснюємо оцінку їх важливості із виключенням з уваги незначних коефіцієнтів. Далі здійснюємо кодування за залежностями (3.3) змінних факторів  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  з реальним їх виглядом як  $P$ ,  $d_{\text{образ}}$ ,  $t$  відповідно.

Перетворене рівняння регресії (3.2), в якому значення відклику у представляє логарифмічний вигляд параметру  $Ra$ , почленно потенціонуємо і в результаті отримаємо степеневу залежність параметру шорсткості  $Ra$  від дослідних факторів у вигляді виразу (3.1).

Адекватність отриманої залежності дослідному процесу оцінюємо за  $F$  – критерієм Фішера [8], розрахункове значення якого має бути більше його табличного значення для прийнятих умов експерименту.

Отже, необхідно виконати наступні дії:

1. Спланувати експеримент, провести дослідження і отримати математичну модель залежності параметру шорсткості поверхні  $Ra$  від дослідних факторів: тиску повітря основного потоку, розміру фракції

					КМ 06.00.00.00 ПЗ	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

абразивних частинок, часу абразивоструменевого оброблення поверхні деталі у вигляді степеневі залежності (3.1).

2. На основі отриманої математичної моделі розрахувати і побудувати поверхні відгуку, що є геометричним місцем точок значень параметрів режиму  $P$ ,  $d_{абраз}$ ,  $t$ , що відповідають за загальним впливом одному конкретно заданному рівню параметру  $Ra$  шорсткості поверхні, що являють собою номограмами для вибору параметрів режиму при абразивоструменевому обробленні.

Приймемо наступні граничні режими абразивоструменевого оброблення:

– тиск повітря основного потоку

$$P_2 = (7...5) \text{ кгс / см} ;$$

– середній розмір фракції абразивних частинок  $d_{мм абраз} = (0,15...0,26)$  ;

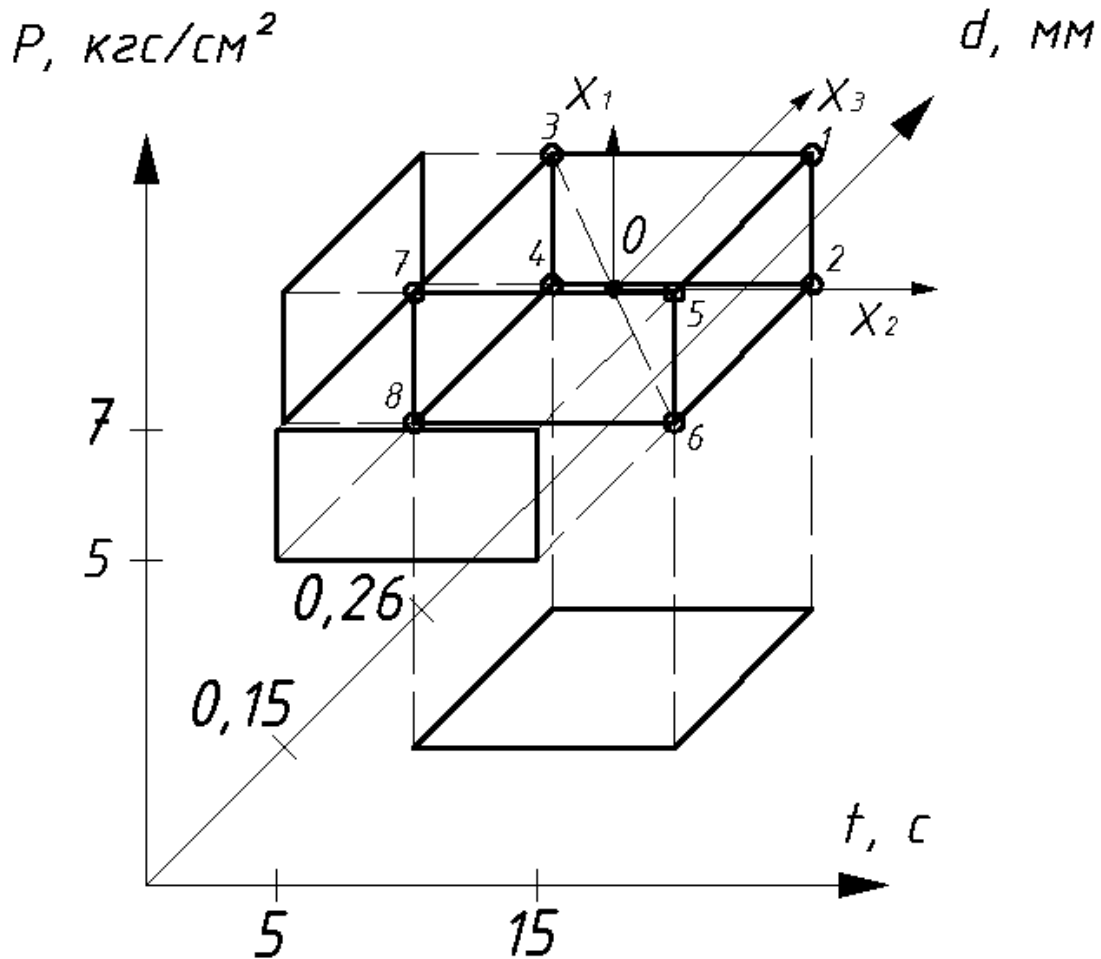
– час абразивоструменевого оброблення поверхні деталі  $t = (5...15)с$  .

Представимо простір прийнятої області експериментування у

вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних факторів  $P$ ,  $d_{абраз}$ ,  $t$ . Згідно методики проведення експерименту [8] необхідно перенести початок координат в центр куба (рис. 4.26 точка "0"), далі присвоюємо новим осям значення  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ , що відповідають напрямкам векторів  $P$ ,  $d_{абраз}$ ,  $t$  відповідно. Точка "0" нової системи координат повинна відповідати основному "нуль"-рівню. Тоді максимальне значення змінних факторів  $P$ ,  $d_{абраз}$ ,  $t$  закодованих як  $1x$ ,  $2x$ ,  $3x$ , будуть в новій системі координат приймати значення як "+1" або "+", а мінімальні значення "-1" або "-". Точки вершини куба 1 ... 8,

що є екстремумами змінних факторів, є граничними точками області експериментування в дослідному просторі.

										Лист
										68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						



Малюнок 3.8 – Графічна інтерпретація факторного простору з граничними точками (1...8) області експериментування.

Зведемо в таблицю 3.7 числові значення рівнів варіювання і коди змінних факторів.

Таблиця 3.7

Рівні варіювання і схема кодових позначень змінних факторів

Рівень варіювання	Тиск повітря основного потоку		Час абразивоструменевого оброблення		Фракційний розмір абразиву $\times 10^{-2}$	
	$P$ , кгс/см <sup>2</sup>	$x_1$	$t$ , с	$x_2$	$d_{абраз}$ , мм	$x_3$
Верхній	7	+1	15	+1	26	+1
Основний	6	0	10	0	21	0
Нижній	5	-1	5	-1	15	-1

Згідно методики проведення повного факторного експерименту з трьома змінними факторами на двох рівнях (max-min) проведемо 8 досліджень за формулою  $N = 2^3$  згідно методики [8]. Кожне дослідження повинно відповідати граничній точці 1 ... 8 експерименту.

№ п/п	Матриця плану $N = 2^3$							
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1x_2x_3$
1	+	+	+	+	+	+	+	+
2	+	-	+	+	-	-	+	-
3	+	+	-	+	-	+	-	-
4	+	-	-	+	+	-	-	+
5	+	+	+	-	+	-	-	-
6	+	-	+	-	-	+	-	+
7	+	+	-	-	-	-	+	+
8	+	-	-	-	+	+	+	-

Малюнок 3.9 – Матриця плану експерименту

$$y = 0,959 - 0,05x_2 - 0,0571x_1 x_2 - 0,061 x_2 x_3 \quad (3.4)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (3.4) з експериментально отриманими даними про шорсткість поверхні при абразивоструменевому обробленні деталей ливарного виробництва здійснюється за F-критерієм Фішера, розрахункове значення якого повинно

бути більше або рівне його табличного значення при прийнятих умовах експерименту, тобто:

$$F_p \geq F_T(p; f_{ad}; f_{\bar{y}}),$$

Згідно прийнятих в експерименті відомих  $p = 0,95$ ,  $f_{\bar{y}} = 16$  і новій умові - числу ступенів вільності дисперсії адекватності, що визначається, як  $f_{ad} = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1) = 4$ , табличне значення критерію Фішера складає  $F_T(0.95; 4; 16) = 3,01$  [108, додаток 3]

Розрахункове значення критерію Фішера визначається з порівняння оцінок дисперсії [8]:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2},$$

де  $S_{ad}$  – дисперсія адекватності;  $S_{\bar{y}}$  – середнє значення дисперсії відтворюваності досліджень.

Дисперсію адекватності розрахуємо за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{1}{f_{ad}} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \bar{y})^2,$$

де  $\bar{y}_i$  – експериментально отримане середньоарифметичне значення параметра шорсткості поверхні в  $i$ -му незалежному дослідженні;  
 $\bar{y}$  – розраховане значення параметра шорсткості в цьому дослідженні;  
 $f_{ad} = N - (k + 1)$  – число ступенів вільності дисперсії адекватності.

Розрахункові значення відкликів моделі визначаються сумуванням в рядках всіх визначальних коефіцієнтів з врахуванням знаку ( $\pm 1$ ) при змінних факторах, що обумовлюють режим проведення дослідження. Результати розрахунку відкликів і їх розбіжності з експериментальними даними наведемо в таблицю 3.8

					КМ 06.00.00.00 ПЗ	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблиця 3.8 – Результати розрахунку

№ досл.	Перетворені коефіцієнти $b_{ij}x_j$				Розрах. значення відклику $\bar{y}_i$	Експери- ментальне значення $\bar{y}_i$	Розбіжність дослідження $(\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2 \times$ $\times 10^{-4}$
	$b_0$	$b_2x_2$	$b_{12}x_1x_2$	$b_{23}x_2x_3$			
1	0,959	-0,05	-0,0571	-0,0607	0,7912	0,8213	9,0601
2	0,959	-0,05	0,0571	-0,0607	0,9054	0,8509	29,7025
3	0,959	0,05	0,0571	0,0607	1,1268	1,1562	8,6436
4	0,959	0,05	-0,0571	0,0607	1,0126	0,9589	28,8369
5	0,959	-0,05	-0,0571	0,0607	0,9126	0,9359	5,4289
6	0,959	-0,05	0,0571	0,0607	1,0268	1,0278	0,01
7	0,959	0,05	0,0571	-0,0607	1,0054	1,0293	5,7121
8	0,959	0,05	-0,0571	-0,0607	0,8912	0,8916	0,0016
Сума розбіжностей $\sum_{i=1}^8 (\bar{y}_i - \bar{y}_i)^2$							87,3957

Розрахункове значення F-критерію Фішера в нашому випадку буде рівне:  
F=0.8

Дана умова задовольняє вимогам оскільки  $FP \leq 1$ , і може бути основою для прийняття моделі в якості робочої при описі залежності параметру шорсткості Ra при абразивоструменевому обробленні деталей.

Значення змінних факторів  $x_1, x_2, x_3$  знаходиться в закодованому вигляді.

					KM 06.00.00.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		71

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg P - \lg 7)}{\lg 7 - \lg 5} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg d_{\text{абраз}} - \lg 26)}{\lg 26 - \lg 15} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg 15)}{\lg 15 - \lg 5} + 1, \end{aligned} \right\}$$

Отримаємо залежність параметру Ra шорсткості поверхні при абразивоструменевому обробленні деталей

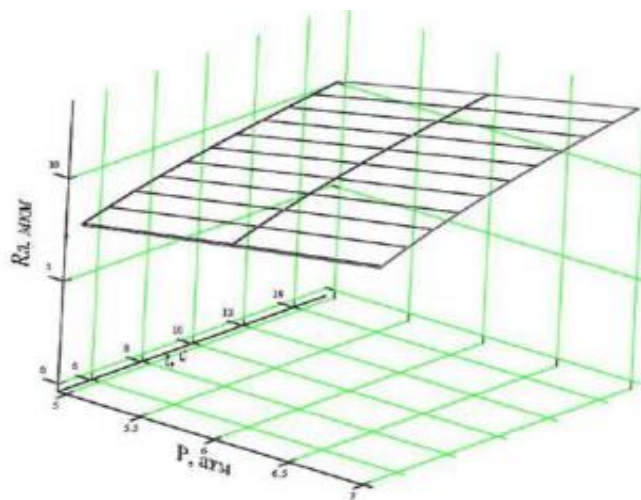
$$Ra = 2,358 \cdot 10^{-8} \cdot d_{\text{абраз}}^{6,6299(1-0,9868 \lg P - 0,32 \lg t)} \cdot P^{8,4736} \cdot t^{2,7566},$$

де  $d_{\text{абраз}}$  – розмір фракції абразиву, мм;

$P$  – тиск повітря основного потоку, атм;

$t$  – час абразивоструменевого оброблення, с.

За виведеною формулою побудовано поверхні відгуку в середовищі програмного забезпечення MathCAD



Малюнок 3.10 – Поверхня відгуку при абразивоструменевому обробленні абразивом з середнім розміром фракційного складу  $d_{\text{абраз}} = 0,2$  мм

Відносна похибка результатів розрахункового значення та експериментального складає  $\xi = 7,44\%$  , що знаходиться в межах рівня довіри ймовірності.

### Висновки за розділом 3

Виконано чисельне дослідження проточної частини циліндричного сопла з діаметром  $d$ , та довжиною  $l$  з використанням програмного комплексу FlowVision. Звичайне циліндричне сопло досліджувалося для встановлення особливостей протікання двофазного середовища з метою пошуку резервів по підвищенню його ефективності.

З отриманих залежностей видна 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  $p_1, p_2$ .

При збільшення прохідного перетину сопла в два рази, величина витрати через нього збільшується в 4.5 рази.

Результати чисельних та експериментальних досліджень показали суттєвий вплив шорсткості поверхні сопла на швидкість витoku абразивного матеріалу. З таблиць (3.1 – 3.5) видно що шорсткість поверхні сопла впливає на його характеристики при роботі з абразивним матеріалом дл 30 % в той час, коли без абразиву вплив несуттєвий ( до 7 %) при умовах мавши місце в дослідях.

Проведена верифікація результатів чисельного дослідження шляхом порівняння з результатами експерименту.

За допомогою математичного апарату встановлено залежності стану поверхні від технологічних режимів абразивоструменевого оброблення деталей та побудовано відповідні поверхні відгуку.

					KM 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		74



## 4. РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ

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

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

Небезпечні вантажі за характером небезпеки при їх транспортуванні поділяються на 4 групи: 1 - малонебезпечні (плоди, овочі, продукти харчування, будівельні матеріали тощо); 2 - небезпечні за своїми розмірами (великогабаритні та багатотонні конструкції, труби великої довжини та ін.); 3 - вантажі, що пилять, димлять або перебувають в гарячому стані (вапно, крейда, асфальт, бітум, цемент насипом і т. п.); 4 - небезпечні за своїми властивостями: вибухівка, бензин, газ та ін. (вони, в свою чергу, згідно з ГОСТ 19433-81, поділяються ще на 9 класів (вибухові; стиснені, зріджені або розчинені гази; пожежонебезпечні; отруйні, інфекційні; високотоксичні; радіоактивні тощо). Небезпечні вантажі повинні маркуватися спеціальними знаками безпеки, що мають форму квадрата, поділеного тонкою горизонтальною лінією на два прямокутні трикутники і окантованого чорною рамкою. У верхньому трикутнику зображується знак небезпеки (вогонь, вибух, символ радіоактивності тощо), в нижньому - напис про небезпечність вантажу та номер класу небезпеки за властивостями. При проведенні робіт з такими вантажами треба бути особливо обережним та ретельно дотримуватися правил безпеки.

Кодексом законів про працю України встановлені граничні норми піднімання та переміщення вантажів однією людиною в залежності від статі та віку: для чоловіків віком 18 років і старших -50 кг (допускається до 80 кг при одноразовому перенесенні на відстань по горизонталі до 25 м, за умови, що вантаж укладається на спину і знімається іншими вантажниками); для

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		75

жінок старших за 18 років -7 кг при постійній роботі й 10 кг при чергуванні з іншою; для юнаків і дівчат 16-17 років-7 кг та 14, а для 17-18 літніх-8 та 16 кг відповідно. Ці норми є обов'язковим заходом, що захищає працівника від надмірної втоми і перевтоми при виконанні тяжких вантажних робіт.

Одним з найважливіших завдань охорони праці є заміна фізичної праці механізованою, що зберігає здоров'я працівників, зменшує собівартість робіт та ризик отримати травму.

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

Транспорт, в залежності від місця його застосування, поділяють на зовнішній і внутрішньозаводський. Зовнішній транспорт призначений для доставки сировини, палива, напівфабрикатів, готової продукції та інших, необхідних підприємству вантажів, і для вивезення з підприємства готової продукції і відходів. Операції зовнішнього транспортування виконуються засобами автомобільного, залізничного, водного і повітряного транспорту, а іноді й гужевого.

Внутрішньозаводський (внутрішній) транспорт може бути міжцеховим і внутрішньоцеховим. Міжцеховий транспорт призначений для транспортування вантажів, сировини, напівфабрикатів, продукції по підприємству до місць їх обробки і зберігання та для видалення відходів виробництва. Вибір засобів міжцехового транспорту залежить від фінансових можливостей підприємства, масштабів і специфіки виробництва.

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Підпись	Дата		76

На сучасних підприємствах з масовим і крупносерійним виробництвом міжцехове та внутрішньоцехове транспортування вантажів виконується, переважно, транспортувальними машинами безперервної дії - транспортерами (назву запозичено з французької мови), або конвеєрами (запозичено з англійської).

Внутрішньоцеховий транспорт застосовується для транспортування вантажів між цехами, виробничими дільницями, окремими агрегатами і робочими місцями та до внутрішніх складів, згідно з технологічним процесом виробництва, тобто для міжоперацій-ного переміщення матеріалів та виробів при поточному методі виробництва.

Механізація і автоматизація вантажно-розвантажувальних і транспортувально-складських робіт (ВРТСР) є одним із найважливіших резервів підвищення продуктивності праці, зниження собівартості продукції, поліпшення умов та підвищення безпеки праці.

Керівники, що відповідають за проведення ВРТСР, повинні визначати порядок і методи їх проведення та використання механізмів і пристроїв, забезпечувати інструктаж та навчання з питань охорони праці. До їх обов'язків входить систематичний контроль за станом безпеки (за застосуванням і правильним користуванням робітниками спецодягом і індивідуальними засобами захисту, за наявністю необхідних знаків безпеки, за дотриманням норм перенесення вантажів, за забезпеченням працюючих інструкціями з правил безпеки і експлуатації обладнання, за станом чистоти і порядку на робочих місцях, в проходах і проїздах тощо).

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

Транспортні шляхи і проходи на території підприємства і в будівлях повинні відповідати санітарно-технічним вимогам, будівельним і протипожежним нормам. Місця, де проводяться ВРТСР, звільняються від зайвих вантажів, снігу, льоду, непотрібних предметів, а в необхідних випадках посилаються піском [29].

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		77

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

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

Для обслуговування транспортерів допускаються особи, які пройшли навчання (відповідний інструктаж) з охорони праці. Перед пуском транспортера в роботу необхідно провести його зовнішній огляд, перевірити кріплення всіх частин, наявність заземлення, справність електрообладнання. Провести пробний холостий запуск без завантаження. Перевірити, чи спрацьовують кінцеві вимикачі. Впевнившись, що транспортер працює справно, можна приступати до його експлуатації.

Усунення виявлених недоліків, регулювання і налагодження вузлів, натяг ланцюгів і стрічки, змащення поверхонь, що труться, та очищення транспортера необхідно проводити при його повній зупинці, вимкненому електродвигуні і заблокованій проти можливості вмикання пускової кнопки. При виконанні цих робіт необхідно повісити на пусковому пристрої плакат:

"Не вмикати - працюють люди!"

Органи управління (рукоятки, кнопки та інше) встановлюють в місцях, які забезпечують добрий нагляд за конвеєром під час його роботи.

					KM 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		78

Транспортери обладнуються звуковою та світловою сигналізацією (сирена, дзвінок, світильники), що попереджує про їх запуск або про аварійну ситуацію.

Транспортери в головній і хвостовій частинах повинні бути обладнані аварійними кнопками "Стоп" для миттєвої їх зупинки. Транспортери, що погано проглядаються по всій довжині, в місцях підвищеної небезпеки, у разі необхідності, додатково обладнуються кнопками "Стоп" (зі сторони проходу). Кнопки "Стоп" також встановлюються при великій довжині транспортера через кожні 10 м і фарбуються в червоний колір.

Конструкція транспортера повинна виключати можливість падіння, зміни положення або сповзання вантажів, що транспортуються; це стосується транспортерів будь-якого типу та конструкції.

Транспортери, призначені для транспортування вантажів, які виділяють пил, пару або газу, повинні обладнуватися аспіраційними системами або витяжною вентиляцією для видалення цих шкідливих речовин. А ті, що призначені для транспортування вологих або липких вантажів, повинні бути закриті кожухами або щитами в місцях, де можливе бризкоутворення, і мати пристрої для очищення від налипання бруду на транспортну стрічку, привідні, кільцеві та направляючі барабани. Пробуксовування стрічки по привідному барабану не допускається. У випадку його виникнення, воно повинно бути ліквідоване способами, передбаченими конструкцією транспортера (збільшенням натягу стрічки, збільшенням тиску пружинного ролика і т. п.). Робота стаціонарних стрічкових транспортерів без пристроїв, що контролюють швидкість, не допускається. При послабленні натягу стрічки забороняється змащувати привідні барабани в'язкими речовинами (смола, каніфоль і т. п.). Відстань від нижньої стрічки конвеєра до підлоги повинна бути не менше 0,15 м.

При автоматичному завантаженні і розвантаженні поштучного або сипкого вантажу швидкість може бути до 1 м/с.

На технологічних лініях, які складаються із декількох транспортерів або конвеєрів, які послідовно встановлені і одночасно працюють разом з

					<i>КМ 08.00.00.00. ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		79

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

Транспортери, крім підвісних, слід монтувати так, щоб відстань по вертикалі від верхніх виступаючих частин транспортера або вантажу, що транспортується, до нижніх поверхонь виступаючих будівельних конструкцій (комунікаційних систем) була не менше 0,6 м.

Для стаціонарних транспортерів повинна бути передбачена можливість механізованого або ручного прибирання підлоги від бруду або вантажу, що розсипався (зачистка) без їх зупинки.

Для обслуговування і ремонту транспортерів повинні передбачатися проходи. Ширина проходів повинна бути не менше:

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

Для монтажу і ремонту стаціонарних транспортерів мінімальна ширина проходів у виробничих приміщеннях повинна бути не менша 0,7 м; висота проходів - 2,2 м, і 1,8 м - для транспортерів, встановлених в галереях, тунелях і на естакадах.

За необхідності, для переходу через транспортери, що мають довжину понад 20 м, в зручних місцях траси обладнують перехідні містки з площадками, шириною не менше 0,7 м, що мають поручні висотою не менше 1 м. Східці містків роблять з нахилом до горизонту не більше 45°. На ділянках транспортерів, огляд яких проводять не частіше 1 разу за зміну, допускається встановлювати містки з вертикальними сідцями, шириною не менше 0,6 м. Настили містків і площадок повинні бути суцільними і

					<i>КМ 08.00.00.00. ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		80

неслизькими. Містки через транспортери повинні розміщатися на відстані один від одного не більше 50 м у виробничих приміщеннях і 100 м у галереях та на естакадах.

Рольганги. При транспортуванні штучних вантажів на невеликі відстані широко застосовуються транспортувальні пристрої - рольганги. Рольганги, або роликові транспортери, можуть бути з електричним приводом і безприводні. Вантаж укладається на роликову доріжку і переміщується в горизонтальній або в похилій площині за рахунок кочення по роликах, що приводяться в дію електроприводом (для горизонтального транспортування) або силою тяжіння вантажу (для похилого). Для створення безпечних умов праці на кінцях похилих рольгангів встановлюють гальмівні пристрої для обмеження швидкості. Якщо вантаж рухається зі швидкістю більше 1 м/с, роблять пристрої у вигляді зустрічних нахилів, амортизаторів і т. ін. Ширина вантажу, що переміщується, не повинна бути більшою за ширину рольганга. Якщо розміри вантажу менші за відстань між трьома роликами, вантаж повинен переміщуватися на піддонах.

У місцях повороту роблять запобіжні борти висотою 0,12-0,13 м, а по всій довжині - борти висотою не менше 0,06 м; відкидні секції повинні відкриватися у бік руху вантажу. Для знімання важких предметів з рольганга можуть застосовуватися різні пристрої. При ручному завантаженні стіл рольганга повинен мати нахил 2-3° в бік руху вантажу і висоту від підлоги не більше 0,9 м. Всі ролики повинні бути зроблені із міцного матеріалу, що запобігає пошкодженню їх несучої поверхні, справними і легко обертатися. Конструкція рольганга повинна без деформації витримувати вагу вантажу, що переміщується. При роботі рольгангів не дозволяється стояти або залазити на його стійки та опори, для зручності обслуговування необхідно передбачити спеціальні площадки та пристрої [29].

					КМ 08.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		81

### 4.3 Характеристика шуму

Існує два визначення шуму: 1 Шум - це неритмічне звукоутворення, безладне змішування звуків. 2 Шум - це будь-який звук, що заважає людині. Статистика стверджує, що останніми роками шум як у побуті, так і на робочих місцях постійно збільшується десь на 1-3 дБ на рік. Шум – шкідливий подразнювальний чинник, який діє на органи слуху і весь організм людини. Якщо шум – це сукупність звуків, доцільно спочатку згадати основні параметри, за допомогою яких можна охарактеризувати звук. Основними параметрами, які характеризують звук, є: 1 Звуковий тиск «р» - це різниця між миттєвим значенням тиску у даній точці середовища при проходженні через цю точку звукової хвилі і середнім тиском, який спостерігається в цій точці за відсутності звукових хвиль. Вимірюється в Па. 2 Швидкість звуку «с»- це відстань, на яку за одну секунду може поширитися хвильовий процес. У повітрі при температурі 20°C і нормальному атмосферному тиску вона дорівнює 344 м/с, при підвищенні температури швидкість звуку збільшується приблизно на 0,71 м/с на кожний градус. Для порівняння: у сталі - 5000 м/с, у гумі - 40-60 м/с. 3 Інтенсивність «I» - це кількість енергії, що проходить у результаті поширення звуку через площу  $1\text{ м}^2$ , розташовану перпендикулярно до напрямку поширення звукової хвилі за одиницю часу. Інтенсивність звуку,  $\text{Вт/м}^2$ , пов'язана із звуковим тиском залежністю  $p = \rho \cdot c \cdot p$ , де  $p$  - звуковий тиск, Па;  $\rho$  - густина середовища,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  - швидкість поширення звуку, м/с. 4 Частота звуку «f» - це кількість коливань за одну секунду, Гц. За частотою весь звуковий діапазон поділено на три частини: Інфразвук – це нечутний для людини звук із низькою частотою – до 20 Гц; Чутний звук – має інтервал 20 – 20 000 Гц; Ультразвук – також нечутний для людини, має частоту вище 20 000 Гц. Чутливість звукового апарату людини до звуків різної частоти неоднакова, найбільшою вона є при частотах 1000 – 5000 Гц, тому за еталонний звук взято звук із частотою 1000 Гц. У діапазоні чутного звуку виділяють дві межі, за допомогою яких можна охарактеризувати вплив звуку на людину. Ці межі мають назву поріг

					Лист
					82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	



чутності та больовий поріг. Це такі значення звукового тиску та інтенсивності, при яких у людини виникають відповідні почуття. Для частоти 1000 Гц ці значення тиску та інтенсивності становлять: поріг чутності:  $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$  Па,  $I_0 = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup>; больовий поріг:  $p_b = 2 \cdot 10^2$  Па,  $I_b = 10^2$  Вт/м<sup>2</sup>. Оскільки людина сприймає звуки в дуже великому діапазоні інтенсивності звуку і звукового тиску, то користуватися для оцінки звуку абсолютними їх значеннями незручно. До того ж вухо людини здатне реагувати на відносну зміну цих параметрів, а не на абсолютну. Тому прийнято оцінювати звуковий тиск та інтенсивність стосовно їх значень на порозі чутності у відносних логарифмічних одиницях – децибелах (дБ). Рівні інтенсивності звуку, дБ, та звукового тиску, дБ, визначаються за формулами  $L_I = 10 \lg$ ,  $L_p = 20 \lg$ . Використання логарифмічної шкали для вимірювання рівня шуму дозволяє вміщувати дуже великий діапазон значень інтенсивності звуку «I» і звукового тиску «р» в порівняно невеликий інтервал логарифмічних величин від 0 до 140 дБ. Зміна 56 рівня інтенсивності звуку на 1 дБ людиною практично не відчувається. Слуховий апарат людини має різну чутливість до звуків різних частот, тому для оцінки впливу шуму на людину необхідно знати частотну картину шуму, тобто його частотний спектр. Частотний спектр – це залежність параметрів звуку ( тиску та інтенсивності) від його частоти. Залежно від характеру спектра розрізняють шуми широкосмугові – якщо він має неперервний спектр шириною більше однієї октави, і тональні – якщо у спектрі є виражені дискретні тони. За часовими характеристиками розрізняють шуми постійні – рівень звуку за 8-годинний робочий день змінюється не більше ніж на 5 дБ, і непостійні – якщо він змінюється більше ніж на 5 дБ. Як правило, параметри шуму та вібрації оцінюють в октавних смугах. За ширину смуги взята октава, тобто інтервал частот, в якому вища частота  $f_2$  в два рази більша за нижчу  $f_1$ . Октава - це така смуга звукового спектру, в якій верхня гранична частота відрізняється від нижньої граничної частоти в 2 рази. Тоді весь спектр набере вигляду: 22,5-45 (31,5); 45-90 (63); 90-180 (125); 180-355 (250); 355- 710 (500); 710-1400 (1000); 1400-2800 (2000); 2800-5600 (4000); 5600-11200 (8000). У дужках зазначені

					<i>КМ 06.00.00.00. ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		83

середньогометричні частоти дев'яти октав, за якими здійснюється нормування шуму. Шкідливий вплив шуму на людину залежить від таких чинників: - звуковий тиск та його рівень; - інтенсивність звуку та її рівень; - частотний спектр шуму; - тривалість дії; - рівномірність. Найбільш шкідливі для людини імпульсні високочастотні шуми.

2 Нормування шуму При нормуванні шуму використовують два методи: - нормування за граничним спектром шуму; 57 - нормування рівня звуку в дБА. Нормування за граничним спектром шуму є основним для постійних тональних шумів. Відповідно до ГОСТ 12.1.003-83 нормуються рівні звукового тиску в 9 октавних смугах із середньогометричними частотами: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000 Гц залежно від виду виконуваної роботи. Із збільшенням частоти шуму (більш неприємний шум) допустимі рівні зменшуються. Граничний спектр – це сукупність рівнів звукового тиску, дБ, в дев'яти октавних смугах частот, які залежать від виду роботи, що виконується. Нормування за рівнем звуку в дБА застосовують для орієнтовної оцінки постійних широкосмугових шумів, що часто має місце у виробничих умовах. Характеристикою непостійного шуму є інтегральний параметр – еквівалентний рівень звуку в дБА. Ці рівні звуку вимірюються за шкалою А шумоміра, тому і мають відповідне позначення дБА. На підприємствах вимірювання шуму на робочих місцях з метою контролю його відповідності санітарно-гігієнічним вимогам повинно проводитися не рідше одного разу на рік. Нормами передбачається робочі зони з рівнем звуку, що перевищує 80 дБА, позначати спеціальними знаками, а тим, хто працює у цих зонах, повинні видаватися ЗІЗ органів слуху. Забороняється навіть короткочасне перебування людей у зонах з рівнем звукового тиску більше 135 дБ у будь-якій октавній смузі [29].

					<i>КМ 08.00.00.00. ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						84
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

## Висновки за розділом 4

В розділі охорони праці розглянуті правила безпеки при виконанні вантажних і транспортувальних робіт. Правила безпеки при монтажі та експлуатації транспортних машин та транспортних засобів. Наведена характеристика шуму.

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		85

## Висновки

1. Наведені результати чисельних та експериментальних досліджень ежекторів зі змінними геометричними параметрами. Дослідження проводилися з метою пошуку резервів по підвищенню ефективності сопел для піскоструменевої установки.

2. Виконано чисельне дослідження проточної частини циліндричного сопла з діаметром  $d$ , та довжиною  $l$  з використанням програмного комплексу FlowVision. Звичайне циліндричне сопло досліджувалося для встановлення особливостей протікання двофазного середовища з метою пошуку резервів по підвищенню його ефективності.

3. З отриманих залежностей видно 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  $p_1$ ,  $p_2$ .

4. При збільшення прохідного перетину сопла в два рази, величина витрати через нього збільшується в 4.5 рази.

Встановлена відмінність в структурі течії робочого потоку в соплах з різними значеннями внутрішнього діаметру  $d=7\text{мм}$  та  $d=20\text{мм}$ . При  $d=7\text{мм}$  маємо чітку нерівномірність параметрів течії на виході з сопла, чого не відбувається при збільшенні параметру  $d$ .

5. Встановлено, що зменшення довжини сопла (до 4 мм) призвело до підвищення швидкості більше ніж вдвічі, що в свою чергу збільшило значення масової витрати суміші та коефіцієнта витрати сопла. Це створило умови до підвищення ефективності роботи ежекторно-очисної установки, а саме час обробки квадратного метра металу зменшився в 4,5 рази і складає 2 хвилини.

					KM 08.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		86

6. Результати чисельних та експериментальних досліджень показали суттєвий вплив шорсткості поверхні сопла на швидкість витоку абразивного матеріалу. З таблиць (3.1 – 3.5) видно що шорсткість поверхні сопла впливає на його характеристики при роботі з абразивним матеріалом дл 30 % в той час, коли без абразиву вплив несуттєвий ( до 7 %) при умовах мавши місце в дослідях.

7. Проведена верифікація результатів чисельного дослідження шляхом порівняння з результатами експерименту.

8. Виконане зіставлення отриманих результатів за допомогою комплексів Ansys та FlowVision.

9. В розділі охорони праці розглянуті правила безпеки при виконанні вантажних і транспортувальних робіт. Правила безпеки при монтажі та експлуатації транспортних машин та транспортних засобів. Наведена характеристика шуму.

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		87

## Список літератури

1. Чаплыгин С.А. О газовых струях. – М.: Гостехиздат. – 1949. – 142 с.
2. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов. М.: – Л., Госэнергоиздат. – 1948. – 288 с.
3. Дейч М.Е., Самойлович Г.С. Основы аэродинамики осевых турбомашин. М., Машгиз. – 1959. – 428 с.
4. Дейч М.Е. Техническая газодинамика. – М. : Энергия. – 1974. – 2-е изд. – 592 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – Изд. 3 – е. – М.: Машиностроение. – 1992. – 671 с.
6. Самойлович Г.С. Новая формула для расчета лабиринтных уплотнений. – Известия ВТИ. – 1950. – № 8.
7. Юдин Е.Я. Охрана труда в машиностроении. Уч. для вузов. М., «Машиностроение», 1976, с.335.
8. Инструкция по охране труда машиниста компрессорных установок” № 42-75.
9. Юдин Е.Я., Борисов Л.А., Горенштейн И.В. и др. Борьба с шумом на производстве (справочник) М. машиностроение 1985 с.400
10. Руководство по эксплуатации струйно-реактивного двигателя ОАО СНМПО им. Фрунзе, Сумы с.80
11. ГОСТ 12.1.005-88. Предел допустимых концентраций вредных веществ в рабочих зонах.
12. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры «машиностроение» Л. 1969 с.890
13. 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.
14. Сичук В.А. Практика виготовлення та випробування зносостійкого

					KM 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		88

сопла піскоструменевої машини отриманого методом сухого радіально-ізостатичного пресування / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // "Наукові нотатки" Міжвузівський збірник. Випуск 31 (червень, 2011) – Луцьк: ЛНТУ, 2011. – С. 350-353.

15. 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.

16. PL-NTU Transgraniczna wymiana doświadczeń. Tom 3 / redakcja Zoriana Herasymchuk Waldemar Wojcik – Луцьк: РВВ Луцького національного технічного університету, 2015. – 171 р. (особистий внесок Viktor Sychuk: Zwiększenie efektywności technologii obróbki powierzchni części odlewnictwa ścierniepotokowym przetwarzaniem 137-154 p.)

					КМ 06.00.00.00. ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		89