

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ВЕТЕРИНАРНОЇ
МЕДИЦИНИ ТА БІОТЕХНОЛОГІЙ ІМЕНІ С.З. ГЖИЦЬКОГО
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему:

**«Інженерний аналіз пристрою для видалення стружки з металообробного
верстата в середовищі SolidWorks»**

Виконав: студент групи Маш-61

Спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва)

Михайло ВОВК

(Ім'я та прізвище)

Керівник: Ігор СТУКАЛЕЦЬ

(Ім'я та прізвище)

Дубляни 2025

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА МАШИНОБУДУВАННЯ**

Освітній ступінь «Бакалавр»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва)

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедри машинобудування

(підпис)

д.т.н., професор Власовець В.М.

«____» _____ 202__ р.

З А В Д А Н Н Я

на кваліфікаційну роботу студенту

Вовку Михайлу Орестовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Інженерний аналіз пристрою для видалення стружки з металообробного верстата в середовищі SolidWorks»

Керівник роботи: Стукалець Ігор Геннадійович, к. т. н., доцент
Затверджена наказом по університету від 28.02.2025 року № 140/К-с

2. Строк здачі студентом закінченої роботи 5.12.2025 року

3. Вихідні дані: діапазон діаметрів штинделів верстатів $D=33...125$ мм; літературні джерела за тематикою кваліфікаційної роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

1. Виконати патентний огляд існуючих та сучасних систем видалення стружки та пилу з поверхонь верстатів.
2. Розробити тривимірну модель пристрою для видалення стружки.
3. Виконати інженерний аналіз запропонованої конструкції пристрою в середовищі SolidWorks.
4. Виконати аналіз отриманих результатів.
5. Запропонувати заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час заходів, пов'язаних з виконанням роботи.
6. Розробити висновки і пропозиції.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу та графічної частини кваліфікаційної роботи

1. Ілюстраційна частина – презентація результатів роботи з висвітленням таких питань:

Результати огляду існуючих систем видалення стружки; запропонований варіант пристрою; методика моделювання конструкції пристрою; методика проведення інженерного аналізу пристрою; аналіз одержаних результатів; висновки.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата		Відмітка про виконання
		завдання видав	завдання прийняв	
1-4	Стукалець І. Г. к.т.н., доцент кафедри машинобудування			
5	Городецький І. М., к.т.н., доцент кафедри інженерної механіки			

7. Дата видачі завдання: 28.02.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Поз. №	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1.	Виконання 1-го розділу	28.02.2025-4.04.2025	
2.	Виконання 2-го розділу	7.04.2025-2.05.2025	
3.	Виконання 3-го розділу	5.05.2025-6.06.2025	
4.	Виконання 4-го розділу	1.09.2025-10.10.2025	
5	Виконання 5-го розділу	13.10.2025-21.11.2025	
6.	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки та ілюстраційної частини. Завершення роботи в цілому	24.11.2025-5.12.2025	

Студент _____ Михайло БОВК
(підпис)

Керівник роботи _____ Ігор СТУКАЛЕЦЬ
(підпис)

Інженерний аналіз пристрою для видалення стружки з металообробного верстата в середовищі SolidWorks.

Вовк Михайло Орестович – Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С. З. Гжицького, 2025. 74 с.

Кваліфікаційна робота: 74 с. текст. част., 42 рис., 1 табл., 19 бібліогр. джерел, презентаційний матеріал у форматі *.ppsx.

В роботі запропоновано конструкцію пристрою для видалення стружки з поверхні металообробного верстата, яка входить в систему, що складається з пристрою (щітки), компресора поршневого ВКП W2200 10-500 (HD), шланга для підключення компресора до щітки, витяжної установки (пилососа промислового для стружки), гофрованого рукава для під'єднання установки до щітки та хомута.

В системі автоматизованого проєктування SolidWorks виконано інженерний аналіз запропонованого пристрою, який полягав у імітаційному моделюванні процесу подачі повітря через вхідний патрубок та відсмоктування повітря витяжною системою. Дослідження проведено в діапазоні зміни продуктивності витяжної системи $Q_{\text{п}}=200\dots3500 \text{ м}^3/\text{год}$ за постійного значення продуктивності компресора $Q_{\text{к}}=2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$.

За результатами інженерного аналізу розроблено рекомендації щодо вибору продуктивності витяжної системи для запропонованої конструкції пристрою та заданого значення продуктивності компресора з метою якісного видалення стружки з металообробного верстата.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ.....	8
1.1. Поява стружки та пилу під час роботи фрезерних верстатів	8
1.2. Існуючі системи видалення стружки та пилу	9
2. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ ТА ПИЛУ	22
2.1. Вибір програмного забезпечення для розроблення та подальшого аналізу.....	22
2.2. Проектування системи видалення стружки та пилу	24
3. ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ ТА ПИЛУ	38
3.1. Вступ в інженерний аналіз.....	38
3.2. Призначення та особливості пакету <i>SOLIDWORKS Flow Simulation</i>	43
3.3. Послідовність роботи в <i>SOLIDWORKS Flow Simulation</i>	45
4. АНАЛІЗ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	47
4.1. Введення початкових даних, налаштування розрахункової програми та моделювання робочого процесу	47
4.2. Аналіз результатів	53
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	62
5.1. Загальні положення.....	62
5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи.....	64
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	71
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	73

ВСТУП

Актуальність та практичний аспект проблеми видалення стружки з поверхонь металообробних верстатів пов'язаний з технологічними процесами обробки та створення виробів за допомогою верстатів з числовим програмним управлінням (ЧПУ). Розглядаючи роботи на фрезерних верстатах з ЧПУ, виникає проблема, пов'язана з виділенням великої кількості летючого пилу, а також дрібної та великої стружки, особливо при обробці різних пластиків, дерева та дерев'яних виробів (фанера, МДФ і т.д.) , каменю, металу. Небажані частинки стружки і пилу налипають на ріжучий інструмент, що зменшує якість різання виробу. Засмоктують приміщення, а головне закриває від спостереження область обробки і заважає контролювати процес виконання роботи верстатом. Попадання стружки на шпиндель і всередину вузлів верстата, що рухаються, підвищує імовірність зносу і відмови обладнання. З точки зору охорони праці, пил шкідливий для органів дихання обслуговуючого персоналу і при певних концентраціях може бути легко займистий або вибухонебезпечний (залежно від оброблюваного матеріалу).

Вищезазначені фактори необхідно ліквідувати або знизити до мінімуму. Для цього, заходи щодо видалення стружки і пилу повинні бути невід'ємною частиною технологічного процесу, особливо коли за один прохід знімається більша частина матеріалу (розкрій, чорнова обробка, свердління і т.д.).

Предметом дослідження цієї роботи є система видалення стружки та пилу під час обробки матеріалу засобами фрезерування на верстатах з ЧПУ. Конструктивно система видалення стружки є довговорсовою щіткою-насадкою на шпиндель, що покриває область обробки. До насадки пристиковується гнучкий гофрований шланг, з'єднаний з потужним промисловим пиłosосом. Електромотор пиłosоса створює розрядження, за допомогою чого частинки стружки і летючий пил відсмоктуються з області різання і через шланг збираються в спеціальні багаторазові мішки-пилозбірники.

Метою даної роботи є розробка автоматизованої системи видалення стружки та пилу для фрезерних верстатів з ЧПУ. Для досягнення цієї мети слід виконати такі завдання:

- 1) аналіз існуючих систем видалення стружки;
- 2) розробка автоматизованої системи видалення стружки та пилу на основі виконаного аналізу інших існуючих систем;
- 3) проведення інженерного аналізу розробленої автоматизованої системи.

Видалення стружки і пилу буде здійснюватися ефективніше при розробці нової системи з можливістю збивати прилиплу стружку з заготівлі, а також з'явиться можливість спостереження і контролю за ходом виконання роботи верстата. Крім підключення промислового пилососа, до системи буде підключатися динамічний компресор.

Методами дослідження цієї роботи є:

- 1) Аналіз літератури стосовно верстатів з ЧПУ;
- 2) Аналіз та порівняння існуючих патентів даної системи;
- 3) Моделювання модернізованої системи на основі виконаного аналізу;
- 4) Інженерний аналіз розробленої системи;
- 5) Порівняння результатів аналізу нової системи з існуючими аналогами.

Об'єкт досліджень – конструкція пристрою для видалення стружки, продуктивність компресора, продуктивність витяжної системи, траєкторії руху повітря у просторі щітки, розподіл тиску на поверхні оброблюваної деталі.

Предмет досліджень – залежність ефективності видалення стружки від значень продуктивності компресора та витяжної системи пристрою.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ В ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИЦІ

1.1. Поява стружки та пилу під час роботи фрезерних верстатів

Фрезерні верстати призначені для обробки за допомогою різального інструменту (фрези) плоских та фасонних поверхонь, тіл обертання, зубчастих коліс тощо, металевих, дерев'яних та інших заготовок. Фреза, закріплена в шпинделі фрезерного верстата, здійснює обертальний рух, а заготовка, закріплена на столі або каретка з закріпленим шпинделем, здійснює рух подачі прямолінійний або криволінійний. Управління може бути ручним, автоматизованим або здійснюватися за допомогою системи ЧПУ.

Фрезерна обробка (фрезерування) - це процес механічної обробки, при якому фреза здійснює обертальний рух.

Фреза – багатозубчастий інструмент, що застосовується для обробки матеріалів на фрезерних верстатах.

Офіційним винахідником фрезерного верстата є англієць Елі Вінтні, який отримав патент на такий верстат у 1818 р.

При фрезерній обробці різних матеріалів можна виділити кілька типів відходів обробки:

1) металева стружка невеликий шматочок металу, що представляє собою тонкий і вузький зрізаний шар. При обробці металів різанням в залежності від їх фізико-механічних властивостей утворюються різні види стружок. Основні три види стружок: зливна стружка утворюється при обробці міді, при обробці чавуну утворюється надламана, при обробці твердих сплавів - стружка сколу;

2) деревна стружка – одна із видів подрібненої деревини. Вона може, як виготовлятися спеціально, так і виходити як відходи деревообробки;

3) летучий пил – це дрібні частинки відходів обробки деревини та пластиків, що витають у повітрі, під час фрезерування матеріалів. З погляду охорони праці – це найнебезпечніший вид відходів під час роботи фрезерних верстатів. Крім того, що пил забиває механіку верстата і призводить до підвищеної похибки роботи, а також до виведення з ладу всього механізму, вона вкрай небезпечна для органів дихання і слизових оператора, що працює

за фрезерним верстатом і для людей, що працюють у тому ж приміщенні. Летучий пил, що з'явився при обробці деревини, є струмопровідною і може викликати коротке замикання в електроніці верстата або в загальному ланцюзі напруги, що в свою чергу може призвести до пожежі. А також при великій концентрації такого пилу в приміщенні може призвести до вибуху у разі виникнення небажаної іскри [1-8, 10].

У зв'язку з вищепереліченим потрібно розробити єдину автоматизовану систему видалення відходів обробки різних матеріалів під час роботи фрезерних верстатів.

1.2. Існуючі системи видалення стружки та пилу

Одночасно з появою фрезерної обробки, оператори зіткнулися з проблемою, стружка з-під фрези летіла в різні боки і потрапляла на механічні частини фрезерного верстата, що призводило до величезної похибки, а також до виходу з ладу обладнання. У зв'язку з цим довелося практично відразу модернізувати влаштування фрезерних верстатів. Перше що було розроблено, це шторка-гармошка, що закриває всі механічні елементи. Вони кріпилися до рухомої частини фрезерного верстата та іншим кінцем до статичної. За рахунок цього вона з одного боку складалася в гармошку з іншого боку розтягувалася.

Потім з розвитком технологій фрезерні верстати почали обробляти величезний спектр різних матеріалів. У зв'язку з цим виникла величезна різноманітність відходів обробки, про які йшлося раніше. Інженерам довелося розробляти різні системи видалення стружки та пилу під час фрезерування різних виробів. Ці системи повинні відповідати деяким критеріям:

- 1) Універсальність - єдина система для всіх видів стружки та пилу;
- 2) Простота виготовлення та використання;
- 3) Можливість застосовувати одну систему на різних фрезерних верстатах;
- 4) Система повинна обмежувати огляд роботи фрезерного верстата.

На даний момент є 9 запатентованих систем для видалення стружки та пилу на фрезерних верстатах:

1) 1281376 – Пристрій для видалення пилу та стружки (рис. 1.1)

Винахід відноситься до галузі металообробки, зокрема до пристроїв для видалення крихкої стружки і пилу від металорізальних верстатів. Метою винаходу є зниження об'єму повітря, що відсмоктується, шляхом роздільного знепилення і стружка видалення. Пристосування складається з відсмоктуючого трубопроводу 1 і з'єднаного з ним пилеструж-приймача, виконаного з двох частин, одна з яких - пилеприймач 2 - розташована в зоні обробки, а інша - стружкоприймач 4 - встановлена на трубопроводі і виконана у вигляді ворони з проміжною камерою 5. При обробці деталей пил, що утворюється, відсмоктується через отвір пилеприймача 2 в трубопровід 1. Стружка зсипається безпосередньо в стружкоприймач, розташований в нижній частині верстата. За рахунок розрядження в трубопроводі 1 через воронку А стружкоприймача прагне надійти повітря.

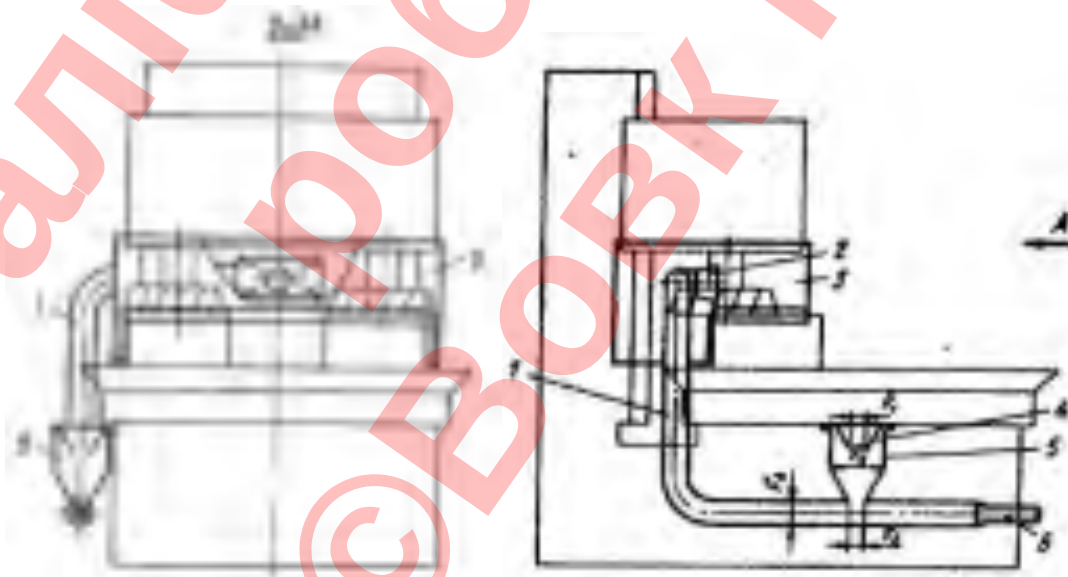


Рисунок 1.1 – Схема пристрою для видалення пилу і стружки 1281376

Однак завдяки наявності проміжної камери 5, площа перерізу якої значно перевищує площу вхідного отвору воронки, виникає додатковий опір проходу повітря за рахунок раптового розширення виходу повітря із завантаженої

частини воронки в ширшу проміжну камеру, що забезпечує зниження об'єму відсіку відсмоктаного повітря.

Дана система вузькоспрямованої дії, працюючи тільки з металевою стружкою і пилом, так само у даної системи немає можливості спостереження за ходом роботи ріжучого інструменту, і ця система розроблена для певних типів верстатів, тим самим ця система не відповідає всім поставленим критеріям цієї системи.

2) 1269971 – Пристрій видалення відходів від токарно-карусельного верстата (рис. 1.2).

Винахід відноситься до галузі металообробки і може бути використане для збирання відходів від токарно-карусельних верстатів з планшайбою більшого діаметру. Метою винаходу є підвищення ефективності видалення відходів. Пристрій містить кожух 2, розташований паралельно бічній поверхні планшайби 10, і охоплював механізм для транспортування стружки, екран 4 з еластичною спідницею, розташованою з можливістю взаємодії з торцевою поверхнею планшайби 10, і систему пневмовідсмоктувача, вхід якої розташований в отворі екрана 4. обертанні планшайби відходи 10 під дією відцентрових сил потрапляють на механізм для транспортування стружки і притискаються до екрану 4, де відбувається відсмоктування пилу і оксидів, що містяться в стружці, після чого стружка падає в механізм транспортування [4, 10].

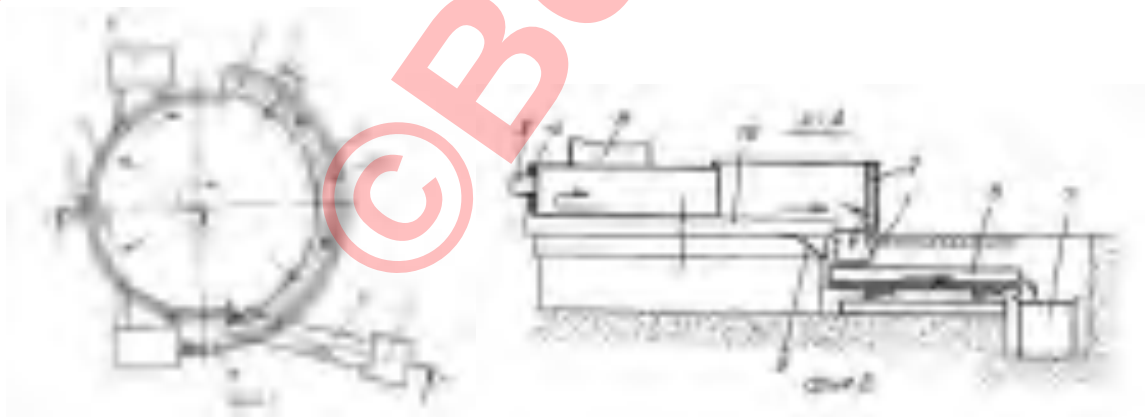


Рисунок 1.2 – Схема пристрою видалення відходів від токарно-карусельного верстата 1269971

Дана система вузькоспрямованої дії, працюючи тільки з токарними верстатами карусельного типу, немає можливості спостереження ходу роботи, що не відповідає поставленим критеріям.

3) 1291362 – Пристрій видалення стружки (рис. 1.3).

Винахід відноситься до верстатобудування, зокрема, до пристроїв для пневматичного видалення стружки із зони різання, наприклад, при фрезеруванні. Метою винаходу є розширення технологічних можливостей пристрою за рахунок використання його з різними ріжучими інструментами і підвищення ефективності видалення стружки при фрезеруванні пазів. З початком обертання інструменту 8, завдяки взаємодії магнітів 17 і 18, починає обертатися внутрішній екран і разом з ним уловлювач, максимальний виліт якого обмежується стопором 23. При врізанні інструменту 8 деталь 21 уловлювач кульовий опорою 20 ковзає по її поверхні. При цьому виліт уловлювача зменшується за рахунок входу їх у канал.

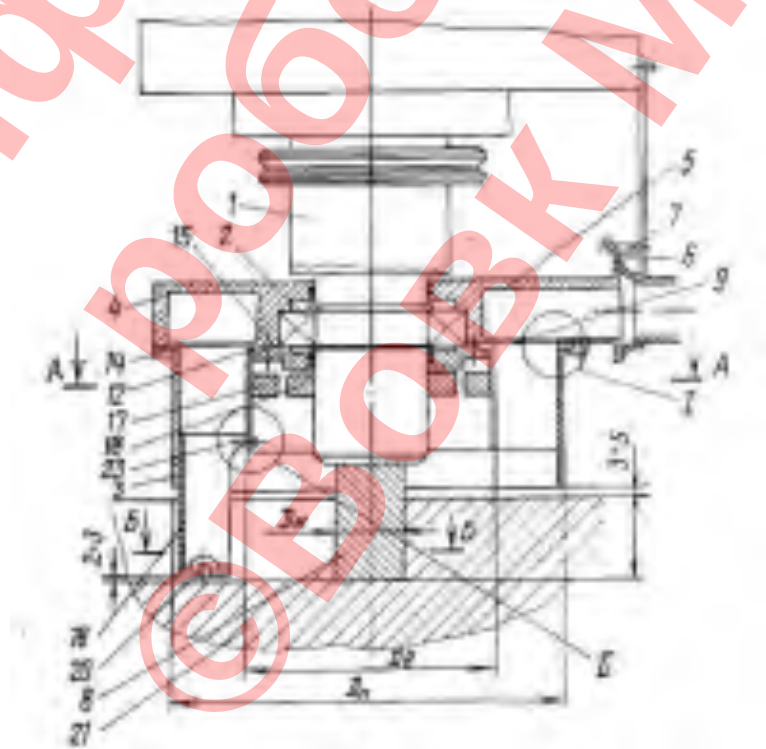


Рисунок 1.3 – Схема пристрою видалення стружки 1291362

Дана система не дає огляд ходу виконання роботи, так само з цієї системи можна вловлювати стружку і пил тільки при різанні і свердлінні, а при

гравіювання вона не актуальна, так як кулька опори весь час повинен стосуватися оброблюваного матеріалу, не всі поставлені критерії виконуються. Перевага даної системи – це видалення стружки та пилу при обробці торцевих пазів.

4) 1343693 – Пристрій для відсмоктування стружки (рис. 1.4).

Винахід відноситься до галузі верстатобудування, зокрема, до пристроїв для відсмоктування стружки із зони різання. Метою винаходу є підвищення ефективності відсмоктування стружки шляхом створення в зоні різання регульованого повітряного вихору. Пристрій складається із зовнішнього 4 і внутрішнього 2 кожухів і розміщених між кожухами під гострим кутом до вертикальної осі пристрою прокладок 8, пов'язаних з кожухами за допомогою радіо розташованих у два ряди пальців 10 і 11. Зовнішній кожух 4 уста з можливістю повороту щодо внутрішнього. При роботі пристрою повітря засмоктується з верхніх торців кожухів 2 і 4 через канали, утворені прокладками 8 з циліндричними поверхнями кожухів 2 і 4.

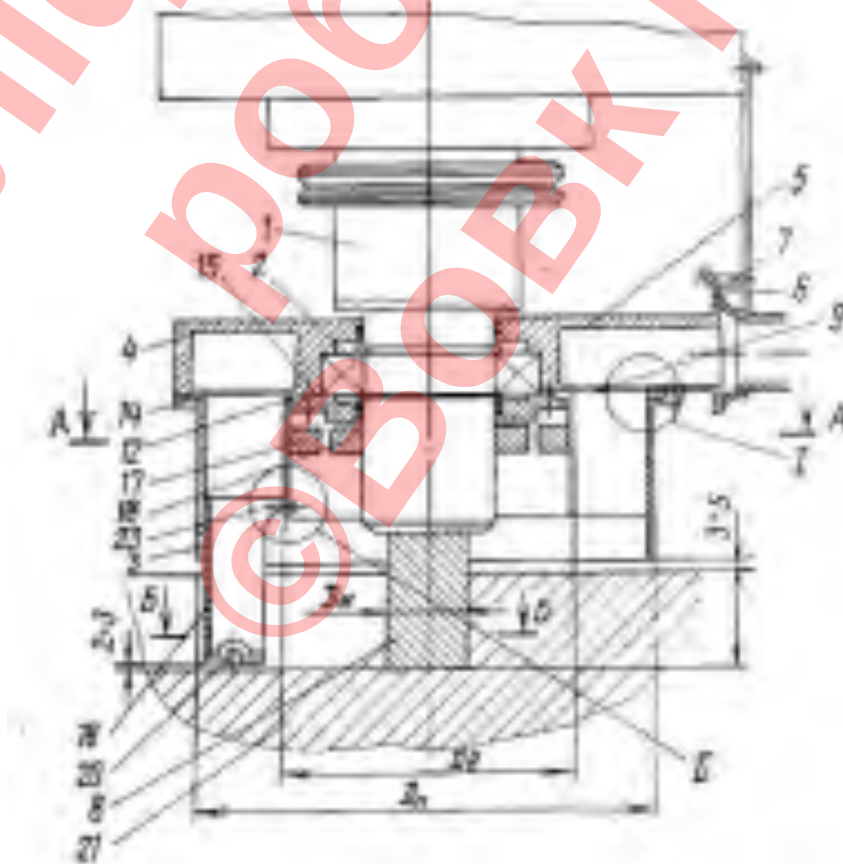


Рисунок 1.3 – Схема пристрою видалення стружки 1291362

Зважаючи на те, що канали розташовані під гострим кутом до вертикальної осі пристрою, що проходить через них повітряний потік утворює завихрення, яке підхоплює стружку і виносить її через патрубок 3 в систему пневмовідсмоктувача. Регулювання кута нахилу здійснюють рахунок ослаблення затискачів і повороту зовнішнього кожуха 4 щодо кожуха 2.

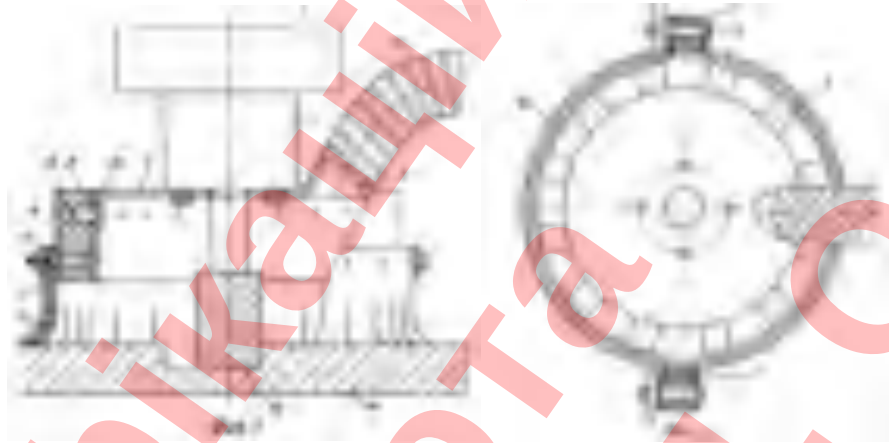


Рисунок 1.4 – Схема пристрою для відсмоктування стружки 1343693

У пристрою для відсмоктування стружки мінусом є повністю закрита система без можливості спостереження за роботою верстата. Позитивними сторонами є те, що дана система може бути застосована на різних фрезерних верстатах зі шпинделями різного діаметру, так само є щітка для м'якого контакту з матеріалом і так само ця щітка не дає розлітатися матеріалу.

5) 1329946 – Пристрій для видалення стружки із зони різання (рис. 1.5).

Винахід відноситься до галузі металообробки, а саме до пристроїв для видалення стружки із зони різання при механічній обробці. Метою винаходу є підвищення якості видалення стружки при обробці обертовим інструментом за рахунок розташування інструмента в полі електромагніту при його відведенні із зони різання. При знаходженні інструменту у верхньому неробочому положенні до нього підводиться пристрій для видалення стружки і при досягненні величини зазору 1-2 мм на електромагнітну котушку 4 подається постійний струм, що призводить до намагнічування інструменту.

При обробці деталі на катушку подається постійний переривчастий струм, що створює в зоні різання пульсуюче магнітне поле. Стружка в цьому випадку починає коливатися і відсмоктуватися через нижній стружкозабірник 3, канал 9 і трубопровід 1. Після завершення обробки інструмент з липкою на нього стружка піднімається вгору, і стружка відсмоктується вже за допомогою верхнього стружкозабірника 2 і трубопроводу 1.

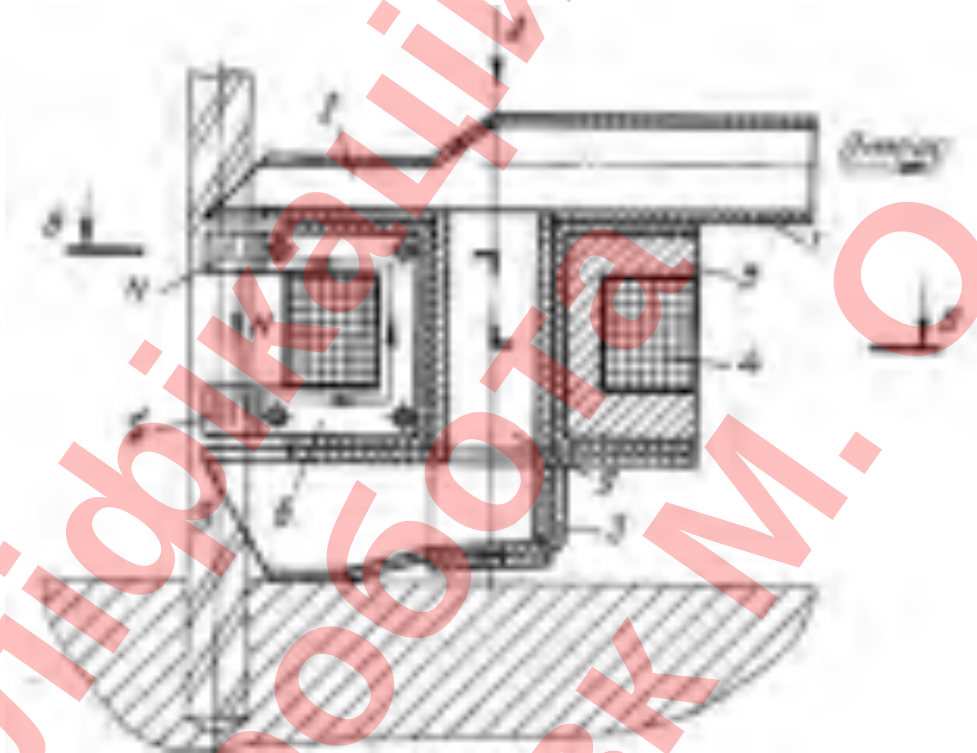


Рисунок 1.5 – схема пристрою видалення стружки із зони різання 1329946.

Пристрій для видалення стружки із зони різання має наступні недоліки, тому що принцип роботи системи побудований на магнітах, цей механізм одягнений працювати тільки з металевим стружками і пилом, через те, що намагнічується сам різальний інструмент це може негативно впливати на роботу шпиндель так, як шпиндель є електромагніт в захищеному кожусі. І за представленою схемою, швидше за все саме пристрій видалення стружки може чіпляти вже оброблений матеріал, що призведе до пошкоджень як самого пристрою, так і ріжучого інструменту, і шпинделя. Позитивною стороною

даного пристрою є магніти, які не дають можливості, металевій стружці, розлетітися на всі боки.

6) 1323338 – Пристрій для видалення стружки (рис. 1.6).

Винахід відноситься до галузі машинобудування, а саме до пневматичних пристроїв для видалення стружки, утворюється при обробці на верстатах, переважно фрезерних. Метою винаходу є підвищення ефективності пристрою за рахунок збільшення інтенсивності повітряного потоку у всмоктувальних і нагнітальних каналах. Пристрій починає працювати при обертанні робочого інструменту, наприклад фрази 5 типу летючої головки. з яким пов'язане робоче колесо 2 вентилятора, обертання якого викликає виникнення повітряного потоку в каналах всмоктування і додаткових каналах 21, 24.

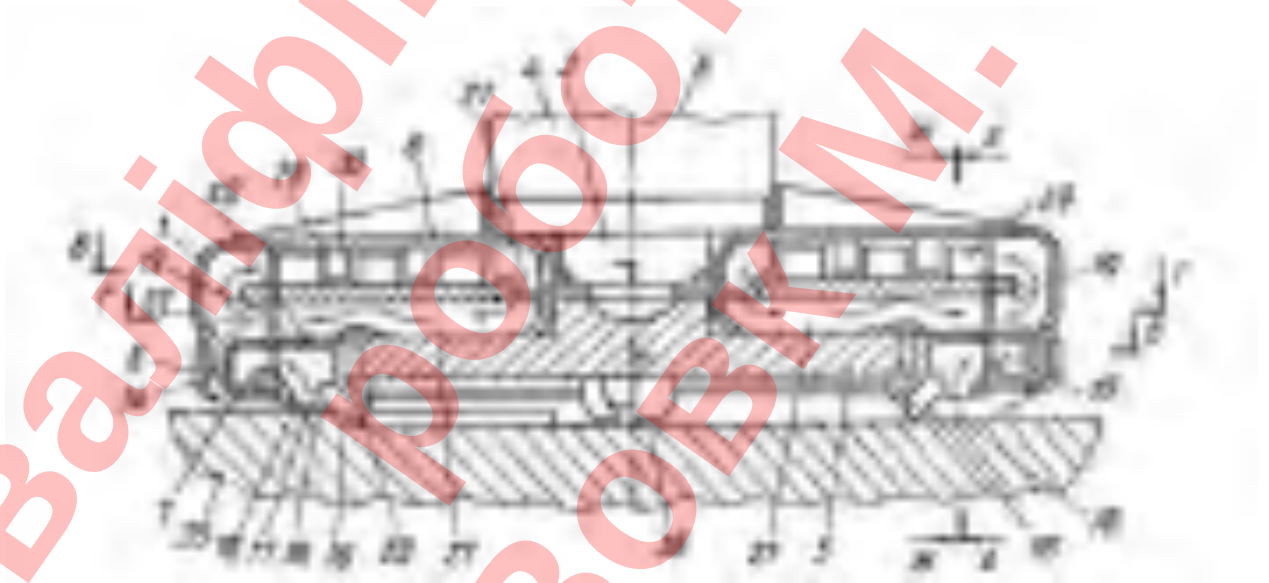


Рисунок 1.6 – Схема пристрою видалення стружки 1323338.

Основна частина повітряного потоку, потрапляючи на входи 19 нагнітальних каналів 14, повертається по порожнині 26 на повторний цикл прискорення, а інша, менша частина каналів 14 нагнітається по периметру кожуха 6 вентилятора в зони обробки. Основний повітряний струм у каналах всмоктування утворюється за рахунок ефекту ежекції в змішувальних камерах 23 на виходах 22 додаткових каналів 21. У каналах всмоктування ця стружка

під впливом робочого повітряного потоку піднімається і зміщується радіально по вхідних отворах.

За рахунок створення різноспрямованих вихрових потоків, стружка видаляється на всьому колі ріжучого інструменту, але немає можливості спостереження за ходом роботи, і канали всмоктування можуть забитися великою стружкою так, як канали досить вузькі, такий пристрій буде працювати тільки з пластиками та деревом.

7) 1328153 – Пристрій для відсмоктування стружки із зони різання (рис. 1.7).

Винахід відноситься до верстатобудування і може бути використане в пристроях для видалення стружки та пилу із зони різання. Метою винаходу є розширення технологічних можливостей пристрою за рахунок можливості його роботи з інструментом різного виду і типорозміру. Пристрій містить охоплюючий інструмент 6 кожух, стружкоприймач 3, вхідні 14 і вихідний 15 патрубки.

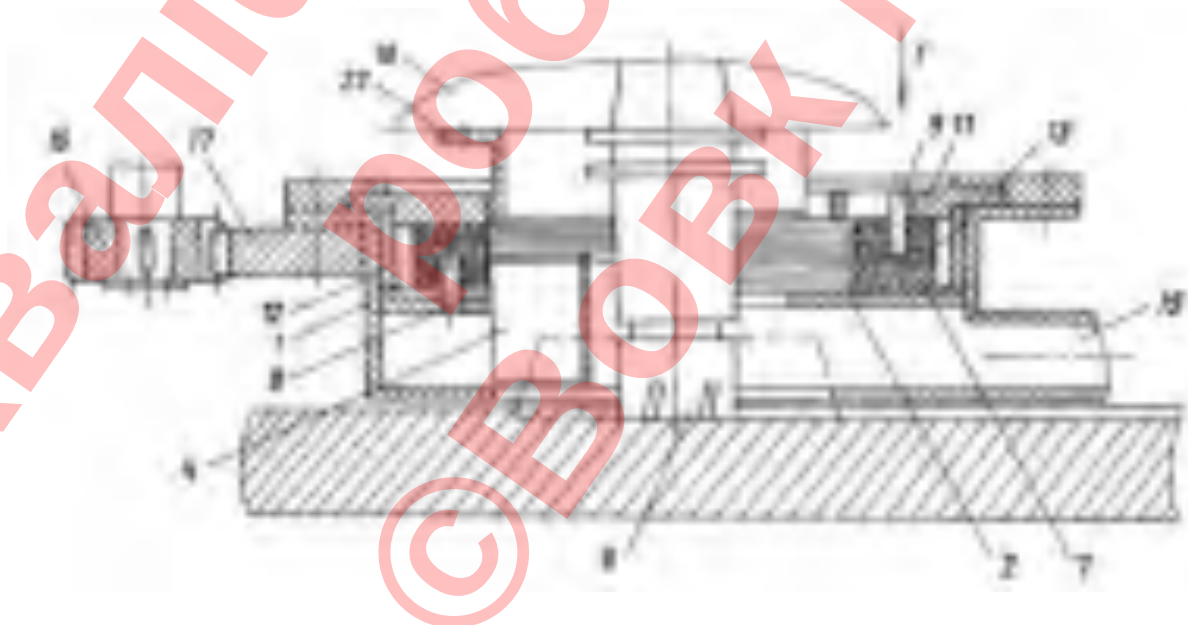


Рисунок 1.7 – Схема пристрою для відсмоктування стружки із зони різання
1328153

Стружкоприймач 3 виконаний у вигляді розташованої в кожусі і пов'язаної з ним ірисової діафрагми і жорстко закріплених на пелюстках, крім вихідної зони патрубка 15, криволінійних пластин 4, утворюють між собою

щілинні сопла 5. Вхідні патрубки 14 розташовані 4 відповідних сопел 5 та з'єднані з системою подачі повітря. Пристрій має можливість роботи з інструментом різного виду і типорозміру за рахунок переміщення пелюсток ірисової діафрагми щодо осі інструменту 6. Це переміщення здійснюється за допомогою приводу, наприклад крокового двигуна, через шестерню 16 і зубчастий сектор 17, закріплений на бічній поверхні кожуха.

У цьому пристрої не передбачено роботу з глибокими рельєфами, а також немає можливості спостерігати за процесом роботи. Позитивного в цьому пристрої те, що підходить до будь-яких на вигляд і типорозміру фрез.

8) 1316790 – Стружкоуловлювач (рис. 1.8).

Винахід відноситься до металообробки, зокрема до пристроїв для видалення стружки при обробці металів свердлінням, і може бути використане при ремонтних роботах. Метою винаходу є підвищення ефективності стружкоуловлювання за рахунок можливості зміни габаритів пристрою в залежності від розмірів обробного інструменту. На поверхню, що підлягає свердлінню, встановлюють сектора 1 постійного магніту стружкоуловлювача, з'єднані між собою пружними пластинами 3, розташованими в напрямних елементах, встановлених на цих пластинах з можливістю поздовжнього переміщення. При зміні діаметра інструменту 2 змінюють внутрішній отвір магніту.



Рисунок 1.8 – Схема стружкоуловлювача 1316790

Даний пристрій не призначений для роботи з рухом, а тільки для свердління металу, тому що весь механізм зав'язаний на перемагнічуванні основи пристрою до поверхні матеріалу, що обробляється.

9) 1296369 – Пристрій для збирання стружки (рис. 1.9).

Винахід відноситься до верстатобудування і призначене для механізованого стружковиділення при механічній обробці. Мета винаходу - підвищення ефективності відведення стружки за рахунок поліпшення утримання стружки при її транспортуванні. З цією метою стрічка 2 для транспортування стружки виконана з окремих шарнірних плат 3, 4, змонтованих на осях і однією стороною вільно лежачих на сусідніх шарнірних платах 3, 4, протилежних напрямку руху стрічки 2. Шарнірні плати 3, 4 встановлені таким чином, що утворюють гострий кут ОС з лінією, що проходить через центри осей двох сусідніх шарнірних плат 3, 4, який постійний по всій довжині стрічки 2. Стрічка 2 наводиться в рух роликами 7 приводного ланцюга, встановленими на осях шарнірних плат 3, 4 і пов'язаними сполучними ланками, на яких встановлені обмежувачі вільного обертання шарнірних плат 3, 4. У шарнірних платах 3, 4, що мають Г-подібний або прямокутний переріз, передбачені отвори для відведення СОЖ, що стікає у відстійник.

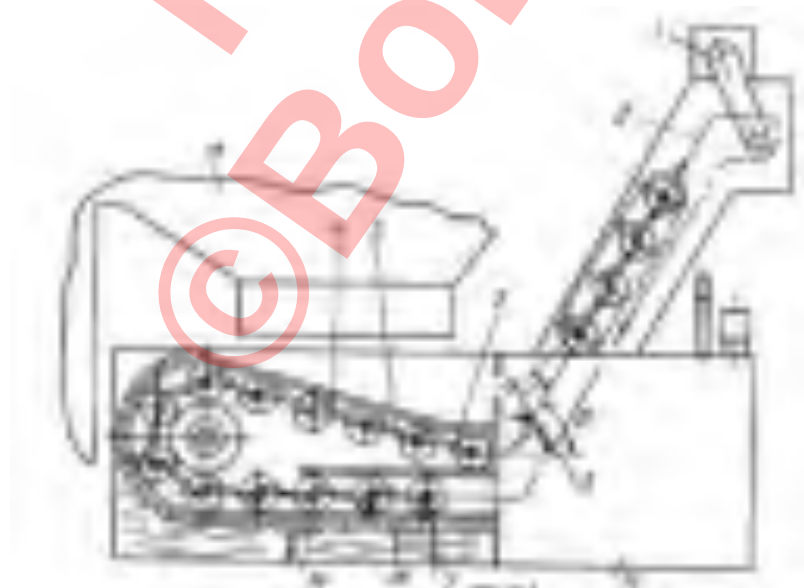


Рисунок 1.9 – схема пристрою для збору стружки 1296369

Є ще дві системи видалення стружки та пилу, які не мають патенти, але також досить поширені. Перше з них пристрій видалення стружки називається «труба», або ще його називають система відкритого типу, принцип роботи такий: з одного боку, встановлюється стружка приймач, навпроти нього, з іншого боку встановлюється шпиндель, вентилятор, зазвичай з підсвічуванням. Під час роботи верстата вентилятор збиває стружку та пил, з місця різання, в стружкоприймач, і по гофрованій трубі всі відходи йдуть у промисловий пилосос. На даний момент - це єдина подібна система, яка дає можливість спостереження за процесом різання, але недолік вагоміше, приблизно половина стружки і пилу пролітає повз стружкоприймача, і ще сильніше розвиває все це по приміщенню, з іншого боку це найдешевша система видалення стружки та пилу. Приклад такої системи – на рис. 1.10.

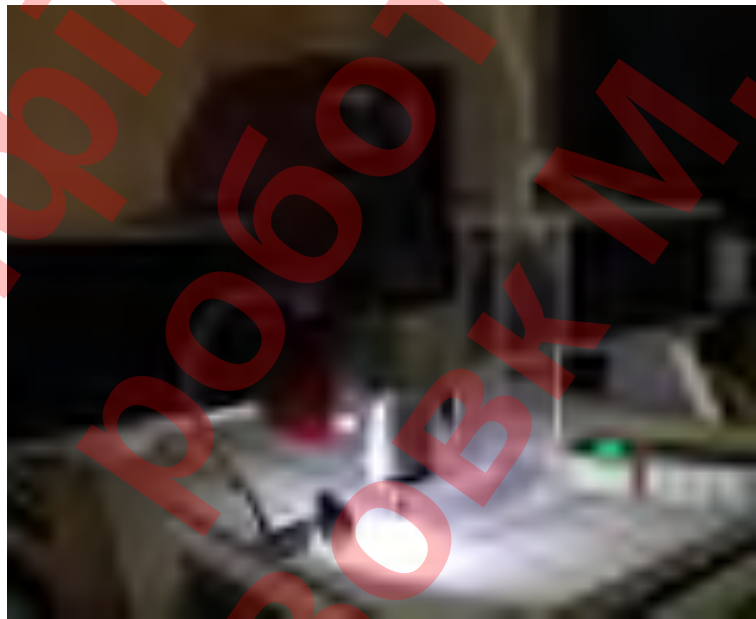


Рисунок 1.10 – Пристрій видалення стружки та пилу відкритого типу

Інший пристрій являє собою насадку на шпиндель з довго-ворсовою щіткою і двома отворами, перший для кріплення до шпинделя, другий для приєднання гофрованого шланга, який веде до промислового пилососа. Недоліки такої системи в тому, що не доступу до огляду роботи верстата, одна така насадка підходить тільки до шпинделя одного типорозміру, і більшість стружки і пилу залишається не зібраними, а прилиплими або такими, що

припеклися до заготовки. Зовнішній вигляд такої системи показано на рис. 1.11 [2, 10].



Рисунок 1.11 – Конструкції насадок на шпиндель для видалення стружки та пилу

Проаналізувавши всі переваги і прибравши всі недоліки, у цій роботі буде розроблена нова система видалення стружки і пилу з урахуванням розглянутих існуючих систем.

2. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ ТА ПИЛУ

2.1. Вибір програмного забезпечення для розроблення та подальшого аналізу

При виборі програмного забезпечення, для розробки системи видалення стружки та пилу, виникли такі питання: що потрібно для моделювання та яке ПЗ це здійснює. Так як подібних програмних продуктів безліч, було вирішено скласти цікаві критерії і, відповідно до них, підібрати відповідний програмний продукт. Критерії для реалізації цього завдання:

- 1) твердотіле моделювання *CAD*;
- 2) спрощення процесу моделювання за допомогою готових бібліотек компонентів;
- 3) можливість переведення до креслень як складання, і окремих деталей;
- 4) можливість зробити рознесення складання та створення анімації для наступних демонстрацій;
- 5) створення фотореалістичного зображення з урахуванням застосованих матеріалів для подальших демонстрацій;
- 6) проведення інженерного аналізу, як на розрахунок міцності, так і на розрахунок руху газів усередині складання *CAE*;
- 7) створення анімації інженерного аналізу для подальших демонстрацій;
- 8) бажано, щоб всі ці критерії були в рамках одного програмного середовища.

Були аналізовані такі варіанти програмних продуктів: Аскон Компас 3D, *Autodesk Inventor*, *SolidWorks*.

В Аскон Компас 3D є твердотільне моделювання, бібліотеки готових виробів, робота з конструкторською документацією, робота з анімованим рознесенням зборки, інженерний аналіз на розрахунок міцності, а до недоліків можна віднести створення фотореалістичного зображення, інженерний аналіз руху газів анімації інженерного аналізу. Компанія Аскон сьогодні перебуває під заборотою в Україні [9, 15, 19].

У Autodesk Inventor відсутній інженерний аналіз руху газів у збірці та інженерний аналіз на напруження потрібно робити за допомогою окремого програмного продукту *Autodesk Simulation*.

SOLIDWORKS виконує всі поставлені критерії, включаючи 8 пункт, але й те саме не все ідеально. Цей програмний продукт потрібно окремо налаштовувати під ДСТУ, оскільки готового профілю немає.

Докладно розберемо систему *SOLIDWORKS*. *SOLIDWORKS* (Солідворкс) – програмний комплекс САПР для автоматизації робіт промислового підприємства на етапах конструкторської та технологічної підготовки виробництва. Забезпечує розробку виробів будь-якого ступеня складності та призначення. Працює в середовищі *Microsoft Windows*. Розроблений компанією *SOLIDWORKS Corporation*, яка нині є незалежним підрозділом компанії *Dassault Systemes* (Франція). Програма з'явилася в 1993 році і склала конкуренцію таким продуктам, як *AutoCAD* та *Autodesk Mechanical Desktop*, *SDRC I-DEAS* та *Pro/ENGINEER*.

Завдання, що вирішуються:

- Конструкторська підготовка виробництва:
 - 3D проектування виробів будь-якого ступеня складності з урахуванням специфіки виготовлення.
 - Створення конструкторської документації.
 - Промисловий дизайн.
 - Реверсивний інжиніринг.
 - Проектування комунікацій.
 - Інженерний аналіз.
 - Експрес-аналіз технологічності на етапі проектування.
 - Підготовка даних для ІЕТР.
 - Управління даними та процесами на етапі КПП.
- Технологічна підготовка виробництва:
 - Проектування оснастки та інших засобів технологічного оснащення.

- Аналіз технологічності конструкції виробу.
- Аналіз технологічності процесів виготовлення.
- Розробка технологічних процесів.
- Матеріальне та трудове нормування.
- Механообробка: розробка керуючих програм для верстатів з ЧПУ, верифікація УП, імітація роботи верстата. Фрезерне, токарне, токарно-фрезерне та електроерозійне оброблення, лазерне, плазмове та гідроабразивне різання, вирубні штампи, координатно-вимірювальні машини.
- Управління даними та процесами:
 - Робота з єдиною цифровою моделлю виробу.
 - Електронний технічний та розпорядчий документообіг.
 - Технології колективної розробки.
 - Робота територіально-розподілених команд.
 - Ведення архіву технічної документації.
 - Проектне управління.
 - Захист даних. ЕЦП.
 - Підготовка даних для ERP, розрахунок собівартості [9, 15, 19].

2.2. Проектування системи видалення стружки та пилу

Система видалення стружки та пилу являтиме собою щітку з отвором для кріплення шпинделя фрезерного верстата, в корпусі щітки виконано два отвори: один – для відсмоктування повітря зі стружкою та пилом за допомогою промислового стружковідсмоктувача-пилососа, інший – для підведення повітря під тиском за допомогою компресора. Для контролю якості очищення поверхні у корпусі передбачено оглядове вікно. Така система у порівнянні з розглянутими у першому розділі системами матиме суттєву перевагу, оскільки додаткове підведення стисненого повітря сприятиме кращому очищенню поверхонь від стружки.

Для початку моделювання спочатку необхідно вивчити інтерфейс *SolidWorks* (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми *SOLIDWORKS*

- 1) Рядок меню – кнопки інструментів, що найчастіше використовуються з панелі інструментів «Стандартна», меню *SOLIDWORKS*, пошуку *SOLIDWORKS* і спливаючого меню параметрів довідки.
- 2) Менеджер команд – це контекстна панель інструментів, яка автоматично оновлюється залежно від панелі інструментів, до якої потрібний доступ. За замовчуванням вона містить вбудовані панелі інструментів, залежно від типу документа.
- 3) Дерево конструювання – відображається контурний вид активної деталі, збірки або кресленика. Можна легко побачити побудову моделі чи збірки, або переглянути різні аркуші та види кресленика.
- 4) Рядок стану – відображає інформацію про виконуваних завданнях.
Типова інформація, що відображається у рядку стану:
 - Короткий опис під час переміщення вказівника на інструмент або при натисканні на елемент меню.

- Значок перебудови  при внесенні змін до ескізу або деталі, які потребують перебудови.
- Стан ескізу та координати покажчика під час роботи в ескізі.
- Зазвичай використовувані виміри для вибраних елементів, такі як довжина кромки.
- Повідомлення, що вказує на те, що деталь редагується під час знаходження у складання.
- Піктограма  для доступу до діалогового вікна Перезавантажити за допомогою параметрів взаємодії.
- Повідомлення, що вказує на вибір припинення автоматичного перестроювання.
- Система одиниць вимірювання , яка показує систему одиниць виміру для активного документа в рядку стану і дозволяє змінювати або налаштовувати цю систему.
- Значок , який дозволяє увімкнути або вимкнути Швидкі поради.
- Значок  для відображення або приховування текстового вікна Мітки, яке використовується для додавання ключових слів до елементів або деталей для покращення швидкодії пошуку.

5) Панель інструментів керованого перегляду – надає всі інструменти, що часто використовуються, для маніпулювання виглядом.

6) Панель допоміжних інструментів містить довідкові матеріали, бібліотеки готових виробів, налаштування зовнішнього вигляду, робота з кресленнями.

7) Графічна область – відображаються деталі, збірки та кресленики, над якими ведеться робота [9, 15, 19].

Після вивчення інтерфейсу приступаємо до моделювання. Для цього потрібно мати уяву про кінцевий результат. Для цього виконаємо ескізне зображення майбутнього виробу (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Ескізне зображення системи видалення стружки

Вивчивши шпинделі різних конфігурацій та типорозмірів, а також існуючі варіанти гофрованих шлангів та трубки для компресора, підбираємо згідно з цими даними відповідні розміри майбутнього виробу.

Першим кроком моделюємо корпус. Для цього створюємо нову деталь, переходимо у вкладку ескіз та вибираємо інструмент ескіз із диспетчера команд. Потім потрібно вказати на якій площині відбуватиметься побудова 2-вимірного ескізу. На виді зверху малюємо ескіз, за допомогою інструментів прямокутник і коло і використовуємо розмір, задаємо розміри кожного елемента, як на рис. 2.3.



Рисунок 2.3 – Ескіз для першої частини корпусу

Потім в диспетчері команд переходимо у вкладку «Елементи» і вибираємо інструмент «Витягнута бобишка/основа» і видавлюємо ескіз на

потрібну товщину. Вийшов перший твердотілий об'єкт, відносно якого відбуватимуться подальші побудови.

Для моделювання другої частини корпусу потрібно створити додаткову площину за допомогою довідкової геометрії, так що вона прилягала б до торця першої частини основи і була повернена на певний кут (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Побудова допоміжної площини

Створюємо новий ескіз на допоміжній площині у вигляді прямокутника і видавлюємо його на відстань з урахуванням діаметра гофрованого шланга і зазорів. На елементі, що вийшов, необхідно вирізати два отвори, перше для оглядового скла, друге для кріплення гофрованого шланга, для цього потрібно створити новий ескіз на отриманій похилій поверхні (рис. 2.5).

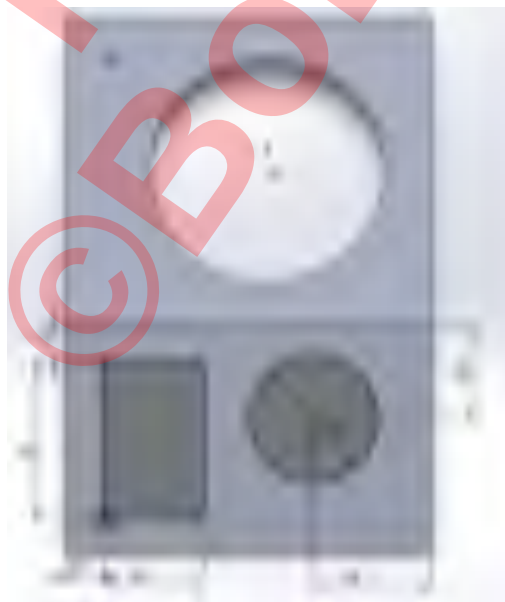


Рисунок 2.5 – Ескіз вирізу отворів у другій частині основи

У диспетчері команд переходимо у вкладку елементи та вибираємо інструмент «Витягнутий виріз», задаємо параметр «наскрізь». Залишилося зробити кріплення для гофрованої труби та кілька фасок та округлень. Кріплення зробимо так, як і для кріплення на першій частині основи і видавимо на певну відстань.

Побудуємо допоміжні осі, що є осями отворів під шпіндель та гофрований шланг. Для цього скористаємося інструментом «Довідкова геометрія», виберемо «Вісь» та клікнемо по відповідній циліндричній поверхні. Далі виберемо «Довідкову геометрію» – «Площина» та побудуємо додаткову площину, яка проходитиме через дві попередньо побудовані осі (рис. 2.6).



Рисунок 2.6 – Побудова додаткової площини через дві осі

У цій площині побудуємо ескіз, у вигляді відрізка з параметром «Для допоміжних побудов» (рис. 2.7) під кутом до вертикалі. Цей кут в подальшому можна буде змінювати для зміни кута подачі до щітки стисненого повітря.



Рисунок 2.7 – Побудова осі вхідного патрубка

Після цього необхідно створити ще одну додаткову площину, яка буде перпендикулярною до осі патрубку. На цій площині створимо ескіз у вигляді двох кіл – 15 мм та 17 мм, та видавимо на відстань 60 мм (рис. 2.8).



Рисунок 2.8 – Побудова вхідного патрубка

В основі кріплень створюємо заокруглення, інструментом у диспетчері команд у вкладці елементи – «заокруглення» ставимо параметр 2 мм. та вибираємо межі основ. Також робимо фаски на вершинах кріплень. Виріжемо у першій частині корпусу отвір всередині патрубку діаметром, що відповідає діаметру отвору патрубку. Одержимо модель корпусу (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Модель корпусу щітки

Одразу задаємо матеріал для корпусу, для цього в дереві побудови натискаємо праву кнопку миші на матеріал, в контекстному меню вибираємо задати, у таблиці, що відкрилася, вибираємо матеріал 7075-T6 Пластина (SS), що відповідає дюралью алюмінію з 6% цинку, 2,5% магнію і 1,5% міді з термообробкою 6 стадії.

Моделюємо захисне, оглядове скло. Для цього перейдемо в режим роботи зі збіркою, для цього натискаємо файл-створити збірку з деталі. Відкривається редактор роботи зі збіркою, там натискаємо створити нову деталь у диспетчері команд. Вибираємо площину, на якій буде розміщена деталь, що створюється. І рисуємо прямокутник трохи більше розміру прямокутного отвору на корпусі. Видавлюємо на певну товщину та задаємо матеріал скло. Виходимо із редагування нової деталі.

Тепер створимо кріплення системи видалення стружки та пилу на шпиндель, зробимо це кріплення знімним, із зміною внутрішнього діаметра для стандартів шпинделів 33, 42, 48, 52, 62, 65, 80, 100, 105, 110, 120, 125 мм. Створюємо нову деталь на площині корпусу, там, де два круглі отвори, будуємо коло, як показано на рис. 2.10.



Рисунок 2.10 – Ескіз основи кріплення шпинделя

Видавлюємо отриманий ескіз на 15 мм. У бічному вушку рисуємо ще ескіз кола діаметром 3 мм, по центру вушка. І вирізаємо наскрізь для болтової

затяжки. Виходимо із режиму редагування нової деталі. Залишилося зробити отвори під кріплення з основою та задати матеріал. На вкладці Елементи вибираємо інструмент отвір під кріплення.

Вдавлюємо на 5 мм, і на новій грані, що утворилася, створюємо новий ескіз. Два незамкнуті кола та невеликі виступи вбік, для затягування системи до шпинделя (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Ескіз притискного кільця шпинделя

У параметрах ставимо отвір стандарт DIN розмір M2,2×0,45. Вибираємо граничну умову, до поверхні та вказуємо нижню частину основи системи видалення стружки та пилу. Переходимо у вкладку розташування та вибираємо поверхню основи кріплення, ставимо одну точку, налаштовуємо розміри та створюємо круговий масив з параметрами 360°, 4 копії. Натискаємо зелену «галочку» (ОК), на моделі з'являються 4 отвори відразу в двох деталях, тепер потрібно повторити ці процедури ще декілька разів, тільки змінюючи внутрішній діаметр кріплення, отвори робимо такі самі граничні умови, ставимо до задньої сторони основи кріплення. В налаштуваннях діаметра отвору під шпиндель налаштовуємо операцію так, щоб кожне значення діаметра було активним лише в одній конфігурації, а в інших – погашене. В результаті одержимо декілька конфігурацій деталі з різними діаметрами отворів під шпиндель (рис. 2.12).



Рисунок 2.12 – Дерево конфігурацій деталі «Кріплення»

На кожне кріплення задаємо матеріал 1.0038 конструкційна сталь, що відповідає лист гарячекатаний ГОСТ 14637-89 СТ 3 низьколегована сталь.

Для встановлення болтових з'єднань скористаємося бібліотекою стандартних виробів *ToolBox*. Для того, щоб активувати бібліотеку, потрібно відкрити вкладку, з правого боку, бібліотека проектування. Потім вибрати *ToolBox* та натиснути кнопку підключити. По скільки робили отвори *DIN*, вибираємо папку зі стандартом *DIN*. Вибираємо папку болти та гвинти, в розділі болти та гвинти з шестигранною головкою, будемо використовувати болт з шестигранною головкою та буртиком *DIN 6921*. Перетягуємо його в отвір і тримаємо ліву кнопку миші, поки не підсвітиться автоматичне сполучення, після цього відпускаємо ліву кнопку миші і ставимо потрібні болта. А саме довжину встановлюємо 20 мм. Після натискання на зелену галочку програма пропонує встановити ще болти із заданими типорозмірами. Натискаємо на всі отвори, що цікавлять нас. І натискаємо хрестик. Тепер закріпимо гайками. У *ToolBox* вибираємо з розділу гайки, *DIN* стандарту, шестигранна гайка з буртиком *DIN 6923*. Переносимо гайку з бібліотеки на вставлений болт, чекаємо поки спрацює пару і відпускаємо ЛКМ. У параметрах все залишаємо як є. Після натискання на зелену галочку, встановлюємо гайки, що залишилися, і натискаємо хрестик. Тепер встановимо болт та гайку в місці обхвату шпинделя. Використовуємо гвинт із шестигранною головкою класу *AB DIN EN 24017*. Гайку використовуємо

низьку шестигранну класу *AB DIN EN 24035*. У параметрах нічого не змінюємо. Результат виконаної роботи – на рис. 2.13.



Рисунок 2.13 – Збірка корпусу, захисного скла та кріплення до шпинделя

Оскільки проектування самих щіток вимагає значних ресурсів ПК, є досить тривалим процесом та невиправданим процесом з точки зору подальшого інженерного аналізу, то щітки в роботі замінимо щітками-заглушками, що на якість результатів моделювання не вплине, проте дозволить значно скоротити тривалість інженерного аналізу запропонованої системи.

Проектуємо кріплення для щіток та самі щітки-заглушки. Створюємо нову деталь і вибираємо зворотну площину корпусу, створюємо бортик. Видавлюємо його на 3 мм, виходимо з режиму редагування нової деталі. Створюємо нову деталь, базовою площиною вказуємо другу частину корпусу зі зворотного боку. Рисуємо ескіз, подібний до попереднього. Видавлюємо його на 3 мм. Двом щойно створеним кріпленням задаємо матеріал, як і на корпусі.

На поверхні граней щіток-заглушок накладаємо текстуру, що імітує зображення щітки, одержуємо збірку, як показано на рис. 2.14.

Змінні насадки, які входять до комплектації системи видалення стружки та пилу, подано на рис. 2.15.



Рисунок 2.14 – Ізометрична проекція спроектованої системи видалення стружки та пилу

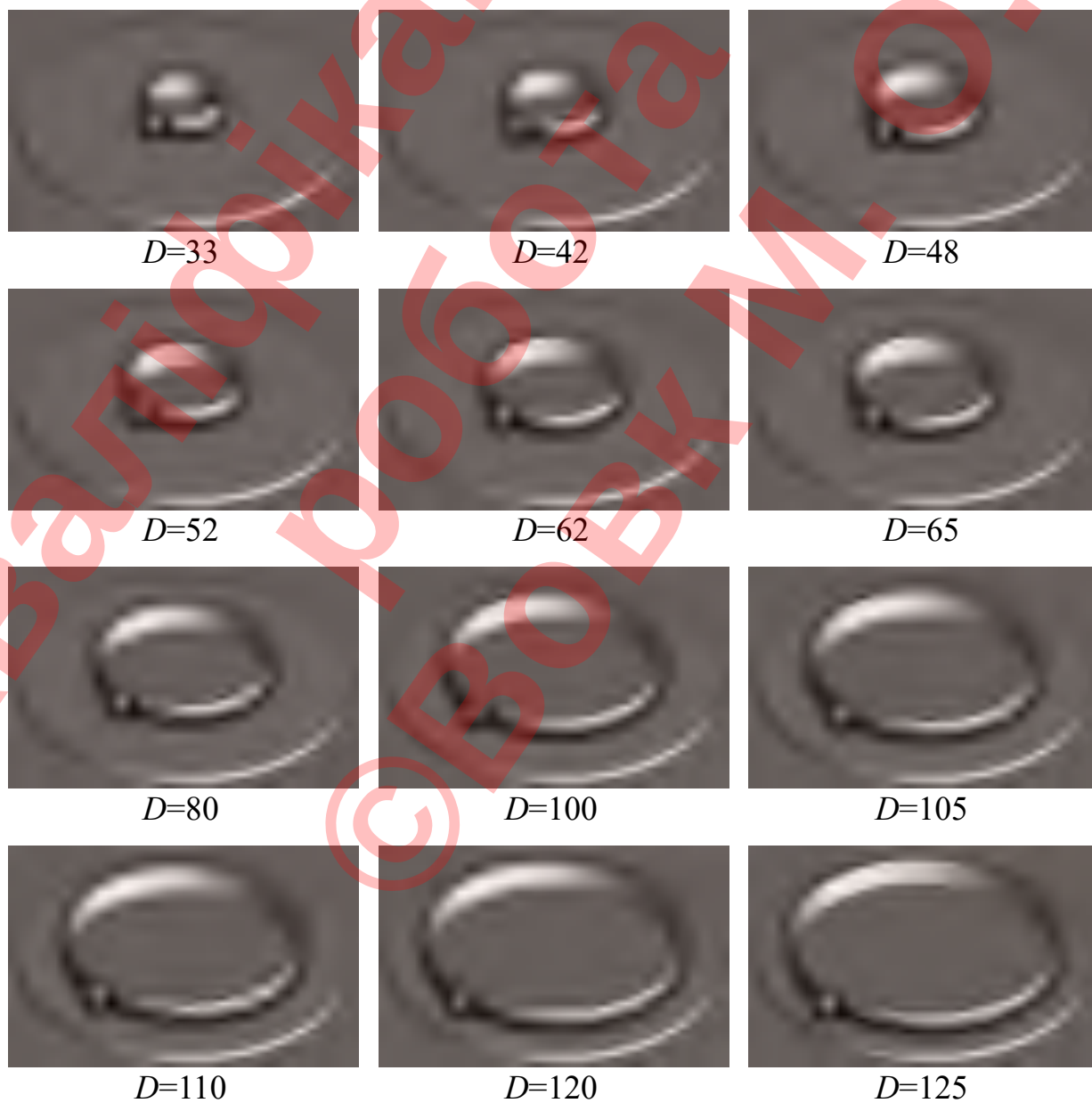


Рисунок 2.15 – Змінні кріплення для з'єднання системи зі шпинделем

Підключення системи видалення стружки та пилу здійснюється таким чином. За допомогою болтів прикручуємо кріплення для шпинделя потрібного діаметра. Встановлюємо систему на шпиндель, таким чином, щоб різальний інструмент був нижче краю щітки не більше, ніж на 5 мм і фіксуємо затискачем за допомогою закручування гайки на гвинті. Підключаємо гнучкий шланг до системи до отвору 15 мм на першій частині корпусу, другий кінець шланга підключаємо до компресора. Встановлюємо гнучку гофровану трубу на отвір 75 мм на другій частині корпусу системи, фіксуємо цю трубу металевим хомутом. Другий кінець труби підключаємо до промислового пилососу. Схема підключення системи показана на рис. 2.16.

Під час виконання кваліфікаційної роботи прийнято, що, окрім запропонованої конструкції щітки, в систему входить компресор поршневий ВКП W2200 10-500 (HD), шланг для підключення компресора до щітки, витяжна установка (пилосос промисловий для стружки), гофрований рукав для під'єднання установки до щітки та хомут. Змінним параметром у системі під час інженерного аналізу слугуватиме продуктивність витяжної установки.



Рисунок 2.16 – Схема підключення системи видалення стружки та пилу

Система повністю готова до роботи.

Рекомендації щодо технічного обслуговування системи видалення стружки та пилу. При пошкодженні оглядового скла є два способи вирішення, залежно від ступеня пошкодження, перший: скло в дрібних подряпинах, через що зменшено видимість роботи ріжучого інструменту, потрібно зняти систему видалення стружки та пилу та натерти з двох сторін з невеликими зусиллями фланелевою або замшевою ганчіркою, оскільки оглядове скло з акрилового пластику, воно таким методом досить легко полірується, прибираючи подряпини. Другий спосіб: якщо вікно розбилося або перший спосіб не допоміг, потрібно замінити скло, акуратно зрізати силіконовий герметик, на якому тримається скло, відчистити поверхню від залишків герметика, і приклеїти новий акриловий пластик, дати герметику висохнути перед використанням. Якщо щітка не збирає пил, потрібно замінити щітки.

3. ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ВИДАЛЕННЯ СТРУЖКИ ТА ПИЛУ

3.1. Вступ в інженерний аналіз

Розвиток засобів обчислювальної техніки стимулювало поширення інженерного аналізу практично на всі етапи проектування як окремих деталей, вузлів і агрегатів, так і виробів в цілому. Різноманіття фізичних процесів у наукомістких výroбах, суб'єктивність у постановці завдань аналізу, у підходах до ідеалізації процесів, що протікають, у виборі методів вирішення та багато інших причин призвели до створення величезного числа спеціальних методик, алгоритмів і програм, призначених вирішення завдань аналізу машинобудівних виробів.

Можна виділити чотири основні групи програм аналізу:

- програмні системи проектування, що органічно поєднують процеси конструювання та аналізу в єдиному комплексі;
- універсальні програми аналізу, одним з провідних методів комп'ютерного моделювання став метод кінцево-елементного аналізу (*FEA*). Інженерний аналіз став практично повсюдним і поступово переріс у потужний напрям, що отримав своє втілення в системах автоматизованого аналізу (*CAE*);
- спеціалізовані програми аналізу, для дослідження динамічних процесів, що протікають у системах автоматичного регулювання та управління, а також для вирішення інших завдань аналізу;
- програми аналізу систем управління.

Різні види аналізу, що виконуються в програмних системах першої, другої та третьої груп, засновані на класичних інженерних підходах до розробки математичних моделей поведінки виробу при різних впливах. У кінцево-елементній постановці завдання моделювання досліджувана область попередньо розбивається на обмежену множину кінцевих елементів, пов'язаних між собою кінцевим числом вузлів. Шуканими змінними рівнянь

математичних моделей є переміщення, повороти, температура, тиск, швидкість, потенціали електричних або магнітних полів. Ці змінні визначають ступеня свободи вузлів. Їх конкретне зміст залежить від типу елемента, що з даним вузлом. Безліч ступенів свободи, що визначають стан всієї системи в даний момент, називають хвильовим фронтом, який може розширюватися або звужуватися в міру того, як невідомі змінні вводяться в аналізовану сукупність або виключаються з неї. Після проходження хвильового фронту через всі елементи та обчислення всіх шуканих змінних можна аналізувати отримані результати та будувати гіпотези про поведінку досліджуваного виробу. У постановці завдання динамічного аналізу міцності враховується збурюючий вплив, який є функцією часу. Можна брати до уваги розсіювання енергії, інерційні ефекти та змінні в часі навантаження.

Загальне рівняння руху в кінцево-елементній формі записується у вигляді

$$MU'' + CU' + KU = F(t),$$

де M , C , K – матриці відповідно до мас, опорів, жорсткостей;

U'' , U' , U – вектори відповідно вузлових прискорень, вузлових швидкостей, вузлових переміщень;

F – вектор навантажень;

t – час.

Потрібні змінні системи рівнянь – це елементи вектора вузлових переміщень U , які в будь-який момент часу повинні задовольняти умови рівноваги системи при наявності сил інерції та розсіювання енергії. Рішення цієї системи рівнянь виконується або прямим методом Нью-марка, або методом суперпозиції форм коливань. До такого типу аналізу належать: динаміка перехідних процесів, модальний аналіз, відгук на гармонійний вплив, спектральний аналіз та відгук на випадкову вібрацію.

Якщо дію сил інерції чи процеси розсіювання енергії малі й істотно не впливають на поведінку виробу, то задача може бути сформульована як статичного міцнісного аналізу. Такий тип аналізу найчастіше

використовується, наприклад, визначення концентрації напружень в галтелях конструктивних елементів чи розрахунку температурних напружень, визначення переміщень, напружень, деформацій і зусиль, що виникають у виробі у результаті докладання механічних сил.

Рівняння статичного аналізу записується у вигляді:

$$KU = F$$

де K – матриця жорсткостей;

U – вектор переміщень;

F – вектор сил.

Компоненти вектора сил: зосереджені сили, теплові навантаження, тиск і сили інерції. У процесі аналізу можна враховувати такі нелінійні властивості, як пластичність і повзучість матеріалу, великі прогини, великі деформації та контактна взаємодія за умови, що навантаження зростають поступово.

У кожній програмі, що реалізує кінцево-елементний аналіз, описується сукупність використовуваних елементів. Чим ширше набір і функціональні властивості елементів, тим більшими можливостями володіє той чи інший програмний комплекс.

Кінцеві елементи зазвичай групуються за призначенням:

- елементи стаціонарного та нестаціонарного теплообміну;
- елементи для моделювання в'язкопружних та в'язко пластичних матеріалів;
- елементи суцільного середовища для аналізу руху потоків рідини та газу, розв'язання задач гідроеромеханіки, акустики та перебігу середовищ у каналах;
- елементи для розрахунку статичних та динамічних напружень;
- елементи для аналізів, що включають як теплові, так і електричні ефекти;
- елементи для аналізу довільно мінливих у часі магнітних полів;
- елементи пов'язаної задачі для розрахунків, в яких враховується взаємодія результатів двох або більше видів аналізу;
- елементи для моделювання нелінійного контакту;

- елементи комбіновані, матричні, поверхневі.

Кінцеві елементи призначені для формалізації задач у двовимірній чи тривимірній постановці. Графічними примітивами елементів є «вузол», «зв'язок», «грань».

Елементи можуть бути лінійними чи нелінійними. Нелінійні елементи дозволяють отримувати більш достовірні результати.

Звичайно-елементний аналіз складається з трьох основних етапів: початкової підготовки, отримання рішень та обробки результатів моделювання.

Серед задач, які інженер вирішує на першому етапі, можна виділити створення моделі виробу, створення сіткової моделі, контроль якості сіткової моделі та її модифікацію, визначення даних та обмежень та ін.

В інженерному аналізі розрізняють три типи моделей: геометричну, розрахункову та сіткову. Геометрична модель зазвичай є модель машинобудівного виробу в цілому або його деталі. Розрахункова модель – це спрощена геометрична модель, яка використовується для аналізу. Нерідко ця модель є складовою самого аналізу. Спрощення або ідеалізація геометричної моделі досягається шляхом видалення тих її елементів, які несуттєво впливають на результати аналізу. Сіткова модель є сукупність вузлів і елементів, яка натягується на розрахункову модель (рис. 2.1). Як зазначалося, геометрична і розрахункова моделі зазвичай створюються на етапі конструювання засобами твердотілого і поверхневого моделювання.

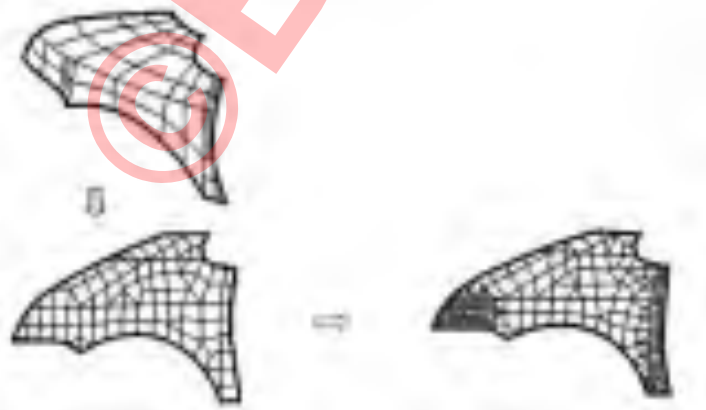


Рисунок 2.1 – Перехід від геометричної моделі до сіткових моделей

У універсальних програмах аналізу закладено широкі можливості оцінки якості сіткових моделей і широкий спектр методів їх модифікацій. Якість сітки можна оцінити як візуально в інтерактивному, так і в пакетному режимі. У процесі візуального контролю є можливість відображати на екрані монітора:

- будь-який тип моделі (геометричну, розрахункову чи сіточну);
- нумерацію вузлів та елементів;
- прикордонні вузли чи зв'язки;
- орієнтацію 2D-елементів або зовнішніх ребер 3D-елементів;
- цілком сіткову модель, її елементи, зв'язки та вузли.

Вихідні дані аналізу, введені на етапі попередньої підготовки, стають частиною бази даних пакета. Змістом бази даних є безліч типів елементів, властивостей матеріалу, параметрів вузлів, навантажень та ін, які відповідним чином групуються і цим групам присвоюються ідентифікатори. Вибір необхідних даних здійснюється або шляхом вказівки графічних примітивів розрахункової моделі на екрані монітора, або використовуючи ідентифікатори груп кінцевих елементів, видів матеріалів, вузлів та елементів та ін.

Результати вирішувача у вигляді декількох таблиць можуть бути записані в текстовий або бінарний файли, не придатні для читання. Тому є такі можливості представлення результатів.

Області напружень, деформацій, температур тощо. відображаються функціями візуалізації у вигляді геометрії або сітки.

Функції виділення, рекомбінації та сортування параметрів дозволяють знайти граничні значення полів напружень, деформацій або температур.

Іноді інженера можуть зацікавити ті значення, які не увійшли як результати вирішувача до файлу звіту та які можуть бути виведені з нього внаслідок математичних маніпуляцій. Їм може бути призначено додаткові розрахунки [9, 15-19].

3.2. Призначення та особливості пакету *SOLIDWORKS Flow Simulation*

Серед завдань CAE обчислювальна гідродинаміка залишалася одним із небагатьох островів, неприступних для широкого кола практичних інженерів. Програмний продукт *SOLIDWORKS Flow Simulation* зробив прикладні розрахунки в галузі аерогідродинаміки та теплопередачі надбанням широкого кола користувачів.

Ця програма – це зручний інструмент в руках інженера для оцінки гідродинамічних процесів. Повністю інтегрована в *SOLIDWORKS*, вона призначена для використання в різних галузях промисловості (вентиляція, теплообмін у приміщеннях, трубопровідна арматура, радіоелектронна промисловість, авіація та ін.). При цьому дане середовище дозволяє легко забезпечувати завдання вихідних даних та перегляд результатів, можливість використання безпосередньо інженером, мінімізуючи час вирішення завдання.

В даний час *SOLIDWORKS Flow Simulation* є одним з небагатьох додатків, що дозволяють вирішувати задачі обчислювальної гідротермодинаміки в рамках систем автоматизованого проектування.

При проектуванні складної техніки виникає необхідність проведення натурних експериментальних аеро-, гідро- та термодинамічних досліджень, що дозволяють визначити працездатність об'єктів у конкретних умовах. Недоліки такого підходу – висока вартість та значний час на підготовку.

Сучасним шляхом створення високоефективної техніки є використання параметричних чисельних досліджень, які досить адекватно моделюють фізичні явища, що розглядаються. При цьому розрахунки повинні виконуватися за допомогою програмного забезпечення, що базується на досить адекватних фізичних явищах, що розглядаються, математичних моделях і забезпечує виконання гідротермодинамічних розрахунків за прийнятний час. Таким програмним забезпеченням і є *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

Для того щоб розрахувати зміну фізичних параметрів у просторі та часі, необхідно провести його математичне моделювання. При цьому фізичні

процеси найбільш адекватно описуються системою диференціальних та/або інтегральних рівнянь із залученням емпіричних констант та залежностей з граничними та початковими умовами, що прив'язують цю математичну модель до конкретної інженерної задачі.

Оскільки системи диференціальних та/або інтегральних рівнянь, які при цьому використовуються зазвичай немає аналітичного рішення, вони наводяться до дискретного вигляду і вирішуються на деякій розрахунковій сітці. Вирішення математичної задачі суттєво залежить від способів дискретизації рівняння та їх вирішення. Розв'язання задачі буде точніше при використанні дрібнішої розрахункової сітки у сфері нелінійної поведінки рішення рівнянь.

SOLIDWORKS Flow Simulation базується на останніх досягненнях обчислювальної газо- та гідродинаміки та дозволяє розраховувати досить широке коло інженерних завдань. Як граничні умови можуть бути задані параметри на стінці, у вхідних та вихідних отворах, припливні і витяжні вентилятори, температура, теплові потоки, об'ємні та поверхневі джерела тепла, радіаційні потоки.

Рух і теплообмін текучого середовища моделюється за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, що описують у нестационарній постановці закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища.

Крім того, використовуються рівняння стану компонентів текучого середовища, а також емпіричні залежності їх в'язкості та теплопровідності від температури.

Для прив'язки математичної моделі до інженерної задачі та конкретної розрахункової галузі *SOLIDWORKS Flow Simulation* використовується метод фіктивних областей. При цьому розрахункова область виявляється меншою за ту область, для якої будується розрахункова сітка і для якої користувач повинен задати початкові та граничні умови.

Необхідність завдання початкових умов (значень фізичних параметрів середовища у розрахунковій області) визначається використовуваною

математичною моделлю та методами їх вирішення. Завдання ж граничних умов (умов на межах розрахункової області) обов'язково для будь-якого завдання, оскільки вони визначають зв'язок фізичних процесів у розрахунковій галузі з процесами поза нею.

Залежно від способу завдання меж розрахункової області всі завдання обчислювальної гідротермодинаміки діляться на внутрішні та зовнішні.

У внутрішніх завданнях заповнена плинним середовищем розрахункова область обмежена стінками моделі; при цьому деякі поверхні стінок розглядаються як вхідний та вихідний отвори моделі.

У зовнішніх завданнях заповнена текучим середовищем розрахункова область обмежена площинами розрахункової сітки, паралельними координатним площинам і повністю лежать у текучому середовищі, що обтікає модель.

Для знаходження чисельного розв'язання задачі безперервна нестационарна математична модель фізичних процесів дискретизується за простором і часом. Для дискретизації по простору розрахункова область покривається розрахунковою сіткою, грані осередків якої паралельні площинам декартової системи координат, що використовується в *SOLIDWORKS*. При цьому використовується метод кінцевих обсягів, значення незалежних змінних розраховуються у центрах осередків. Сама розрахункова сітка описується її осередками, що мають форму паралелепіпеда.

Одним із елементів пакету *SOLIDWORKS Flow Simulation* є програма *FloXpress*. Це урізана версія цього продукту, що дозволяє скористатися засобами тривимірного моделювання потоків рідини та імітації процесу передачі тепла в середовищі *SOLIDWORKS*.

3.3. Послідовність роботи в *SOLIDWORKS Flow Simulation*

Робота в середовищі *SOLIDWORKS Flow Simulation* передбачає виконання таких етапів:

1. Відкрити файл існуючої моделі або створити нову модель як деталь.

2. Зробити в моделі розріз так, щоб виявились впускний і випускний отвори.
3. Перевірити геометрію моделі. Програма перевірить геометрію моделі та визначить, чи відповідає вона вимогам замкнутості.
4. Вибрати середовище, яке проходитиме через модель; при цьому не можна одночасно використовувати різні середовища.
5. Задати межі моделі, що оточують внутрішню порожнину, для чого виконати операції 6 та 7.
6. Вибрати грань, до якої будуть застосовані граничні умови впускного отвору потоку, та встановити вхідні параметри.
7. Вибрати грань, до якої буде застосовано граничні умови випускного отвору потоку, та встановити вихідні параметри.
8. Вирішити модель, при цьому рівень кінцевої роздільної здатності, створення сітки та інші складні умови програма призначає автоматично.
9. Переглянути результати, зберегти окремі види моделі та створити звіт.

Слід зазначити, що всі отвори моделі потрібно закрити заглушками. Це потрібно врахувати під час аналізу моделі чи створенні нової деталі.

Для того щоб створити заглушки в моделі, потрібно створити нову деталь, що повністю закриває впускний та випускний отвори. Для створення заглушки слід вибирати тверdotілий елемент, створений, наприклад, операцією видавлювання. Поверхні не можна використовувати як заглушки [15-19].

4. АНАЛІЗ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

4.1. Введення початкових даних, налаштування розрахункової програми та моделювання робочого процесу

Для виконання інженерного аналізу процесу руху повітря всередині моделі необхідно в нижній частині моделі створити плоску поверхню, які імітуватиме поверхню оброблюваної деталі. Для зручності всі елементи моделі можна зробити напівпрозорими. Після цього можна запустити модуль *SOLIDWORKS Flow Simulation*. Для цього переходимо у вкладку «Додатки *SOLIDWORKS*» і вибираємо модуль *SOLIDWORKS Flow Simulation* на диспетчері команд. Переходимо в вкладку *Flow Simulation*, що з'явилася.

Натискаємо на диспетчері команд інструмент майстер проекту і в вікні задаємо послідовно параметри створюваного інженерного аналізу.

За запит програми з пропозицією створити заглушки погоджуємося, оскільки вся досліджувана область повинна бути замкнутою. Для встановлення заглушок натискаємо лівою кнопкою миші на торцевих кромках отворів корпусу: отвір для підведення стисненого повітря, для кріплення шпінделя та приєднання гофрованого рукава.

У першому вікні називаємо новий аналіз руху повітря в системі видалення стружки та пилу, натискаємо далі. У другому віконці вибираємо систему одиниць вимірювання *SI* і змінюємо параметр, який цікавить, і натискаємо далі. У постановці задачі вибираємо внутрішню і ставимо галочку «виключити площини без умов течії».

Поточне середовище вибираємо «повітря» із розділу газу, та натискаємо далі. Потім натискаємо далі не змінюючи параметрів до завершення роботи майстра проекту. Натискаємо правою кнопкою мишки на розрахункову область, з контекстного меню вибираємо змінити область, і робимо її трохи більшою за розміри моделі. Ще раз на розрахунковій ділянці натискаємо правою кнопкою мишки і вибираємо приховати.

Далі необхідно задати три граничні умови: перша, об'ємна витрата на вході. Клікаємо правою кнопкою миші на папці «Граничні умови» – «додати»,

вибираємо внутрішню поверхню заглушки на отворі для підведення стисненого повітря та задаємо параметр $0,0367 \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає продуктивності компресора $2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$ (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Задання об'ємної витрати на вході

Друга гранична умова – об'ємна витрати на виході. Клікаємо правою кнопкою миші на папці «Граничні умови» – «додати», вибираємо внутрішню грань заглушки в отворі для відсмоктування повітря і задаємо значення об'ємної витрати – наприклад, $0,56 \text{ м}^3/\text{с}$, що відповідає продуктивності пиłosоса $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 4.2).

Третьою граничною умовою потрібно задати тиск навколишнього середовища на циліндричному отворі кріплення шпинделя з нормальними умовами. Вибираємо нижню грань відповідної заглушки та задаємо параметри нормального тиску і температури (рис. 4.3).



Рисунок 4.2 – Задання об'ємної витрати на виході



Рисунок 4.3 – Задання умов навколишнього середовища

Після цього встановлюємо глобальні цілі. Клікаємо на папці «Цілі» правою кнопкою миші, «додати» і вибираємо два параметри: середня швидкість та інтенсивність турбулентності.

Модель із заданими вхідними параметрами має вигляд, як показано на рис. 4.4.



Рисунок 4.4 – Модель щітки із заданими вхідними параметрами

Запустивши розрахунок руху повітря всередині системи, комп'ютер обробляє вхідні дані з урахуванням геометрії моделі та граничних умов. Після виконання розрахунків у графічній області не буде будь-яких змін. Щоб побачити результат потрібно перейти в папку «Результати».

У папці «Результати», натиснувши правою кнопкою миші на «Графіки цілей» можна вивести дані середньої швидкості руху повітря всередині щітки та інтенсивності турбулентності (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – Виведення результатів швидкості та інтенсивності турбулентності

Графічне відображення ітераційної процедури розрахунку результатів можна переглянути на відповідних графіках, які формуються у результатах графіків цілей (рис. 4.6, 4.7).

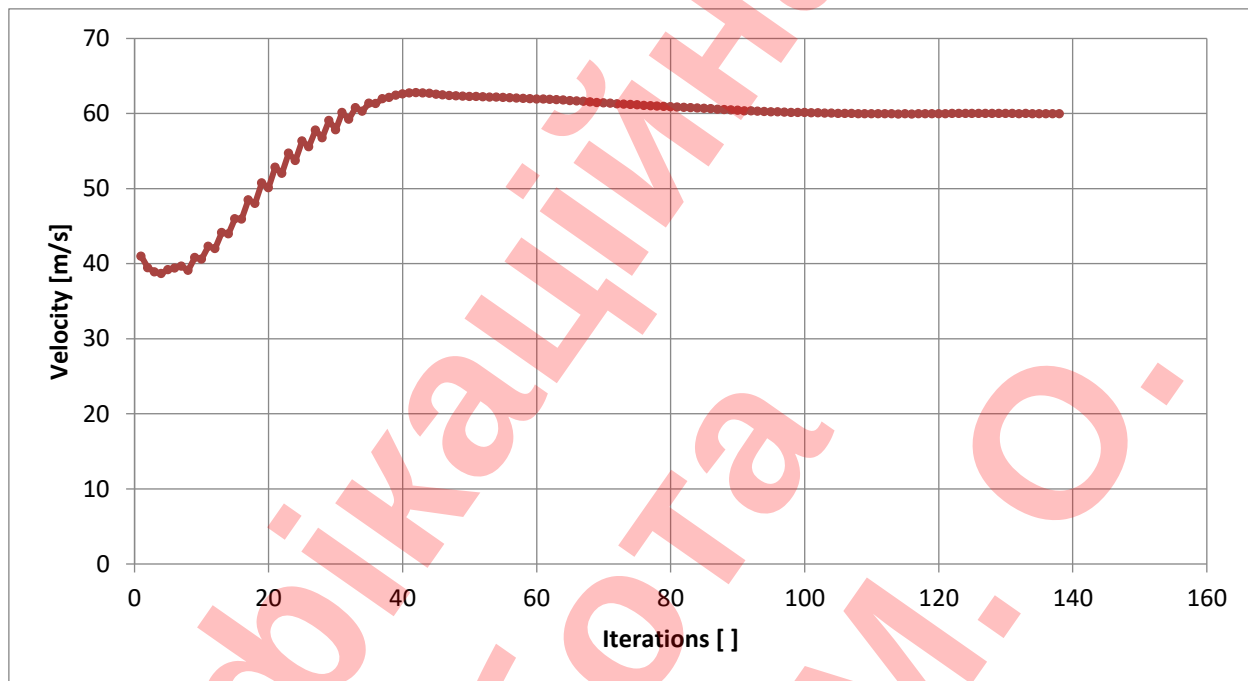


Рисунок 4.6 – Ітераційна процедура визначення середньої швидкості повітря

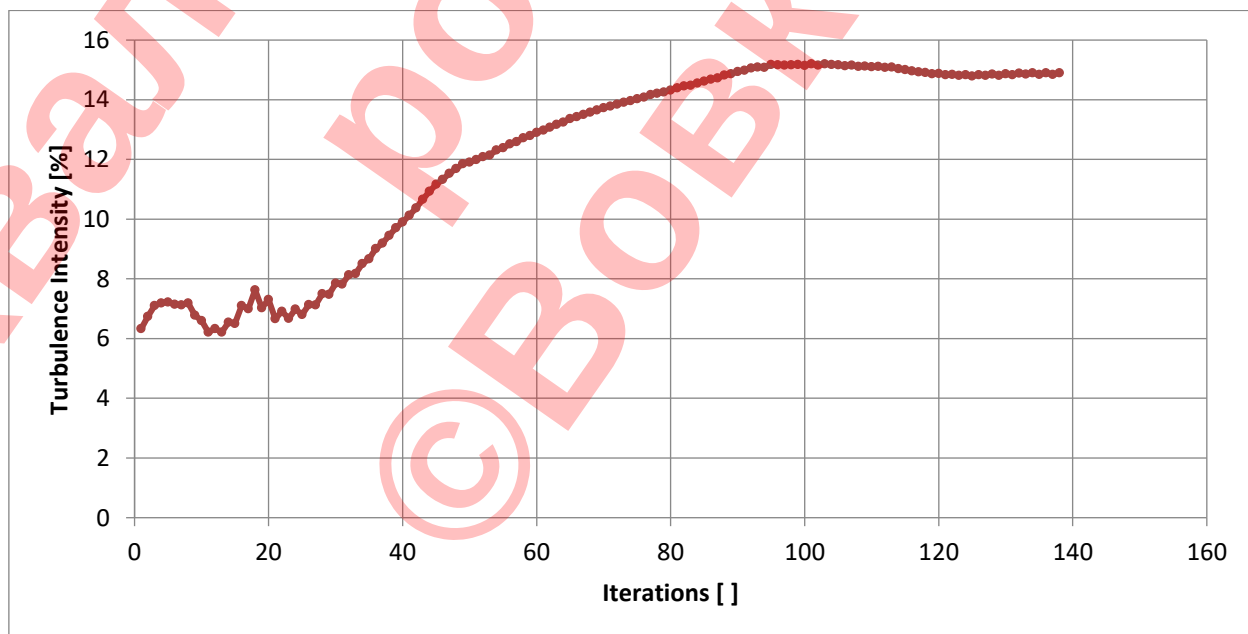


Рисунок 4.6 – Ітераційна процедура визначення інтенсивності турбулентності

Так для значення продуктивності компресора $2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$, та продуктивності пиłosоса $2000 \text{ м}^3/\text{год}$ середня швидкість руху повітря становитиме $59,99 \text{ м/с}$, а середня інтенсивність турбулентності – $14,92\%$.

Для візуалізації процесу руху повітря всередині моделі необхідно на папці «Траєкторії потоку» натиснути праву кнопку миші та вибрати пункт «Вставити». Далі в менеджері властивостей вибрати поверхню – внутрішню циліндричну поверхню отвору для подачі стисненого повітря, після цього налаштувати параметри: кількість потоків, відображення лініями задати їх товщину тощо. Після налаштувань система генерує траєкторії руху повітря відповідно до попередніх налаштувань. Візуалізацію руху повітря подано на рис. 4.7.



Рисунок 4.7 – Графічне відображення траєкторій руху повітря всередині системи

Цікавими є також результати за розподілом тиску по поверхні деталі, що обробляється. Для відображення цього результату потрібно натиснути правою кнопкою миші на папці «Графіки поверхонь» – «Вставити». Далі вибрати необхідну поверхню, в параметрах задати «Контури» та «Ізолінії» і налаштувати параметри відображення епюри тиску на поверхні.

Таким чином, отримаємо епюру тиску на поверхні деталі, що обробляється (рис. 4.8).

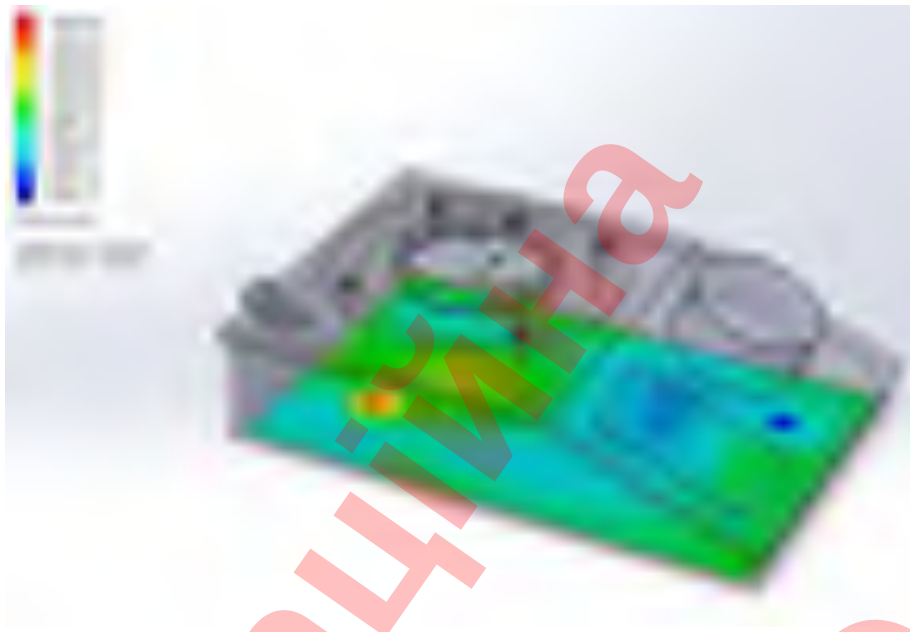


Рисунок 4.8 – Епюра тиску на поверхні деталі, що обробляється

Також програма в автоматичному режимі створила повний звіт зробленого інженерного аналізу розрахунку руху повітряного потоку всередині системи видалення стружки та пилу.

4.2. Аналіз результатів

Інженерний аналіз, описаний у підрозділі 4.1, проведений за таких значень вихідних даних:

- продуктивність компресора – $2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$;
- продуктивність витяжної установки (пилососа для стружки) – 200, 500, 100, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 $\text{м}^3/\text{год}$;
- параметри середовища:
 - тиск повітря – 101325 Па;
 - температури повітря – 293,2 К.

Інженерний аналіз системи видалення стружки виконано для восьми різних варіантів продуктивності пилососа та одержано відповідні результати.

Окрім визначення середньої швидкості руху повітря всередині щітки та середнього значення інтенсивності турбулентності, встановлено також

значення різниці тисків на поверхні деталі для усіх варіантів продуктивності пиłosоса.

Звіти з інженерного аналізу системи видалення стружки наведено в додатках кваліфікаційної роботи.

Результати проведених розрахунків зведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Зведені результати інженерного аналізу системи видалення стружки

Продуктивність компресора Q_k , $\text{м}^3/\text{хв}$	Продуктивність пиłosоса $Q_{\text{п}}$, $\text{м}^3/\text{год}$	Інтенсивність турбулентності ε , %	Швидкість руху повітря, V м/с	Різниця тисків на поверхні деталі ΔP , Па
2,2	200	40,57	20,07	9619
	500	25,79	24,8	9433
	1000	16,87	35,79	9364
	1500	15,29	48,92	11604
	2000	14,92	59,99	13935
	2500	15,05	68,22	15410
	3000	15,18	74,36	16740
	3500	15,17	78,98	17814

Встановлено, що середній рівень турбулентності в системі на розглянутому діапазоні продуктивностей пиłosоса $Q_{\text{п}}$ максимального значення досягає за продуктивності $Q_{\text{п}}=200 \text{ м}^3/\text{год}$. Зі зростанням продуктивності пиłosоса до $1000 \text{ м}^3/\text{год}$ інтенсивність турбулентності стрімко спадає, однак на діапазоні значень $Q_{\text{п}}=1000\dots3500 \text{ м}^3/\text{год}$ значення інтенсивності турбулентності залишаються практично незмінними і коливаються в межах $\varepsilon=14,9\dots15,3 \%$ (рис. 4.9).

Швидкість руху повітря в системі видалення стружки з підвищенням продуктивності пиłosоса зростає практично лінійно, від $V=20,07 \text{ м/с}$ при $Q_{\text{п}}=200 \text{ м}^3/\text{год}$ до $V=78,98 \text{ м/с}$ при $Q_{\text{п}}=3500 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 4.10).

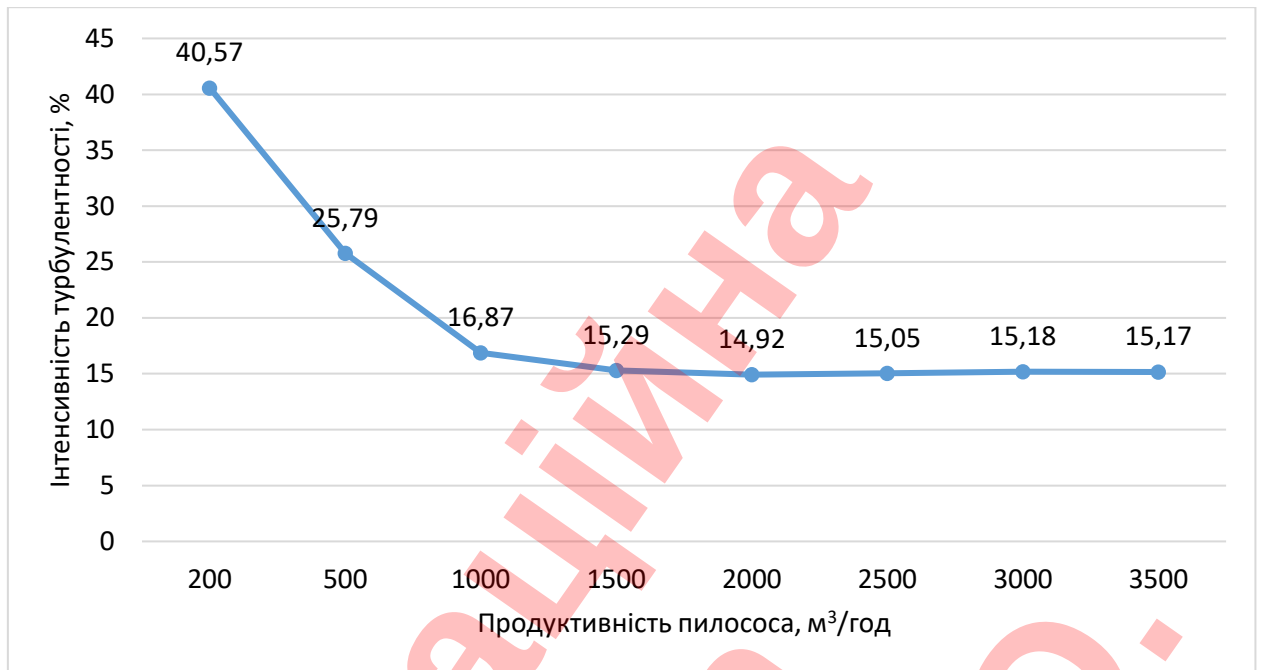


Рисунок 4.9 – Залежність середньої інтенсивності турбулентності від продуктивності пілососа

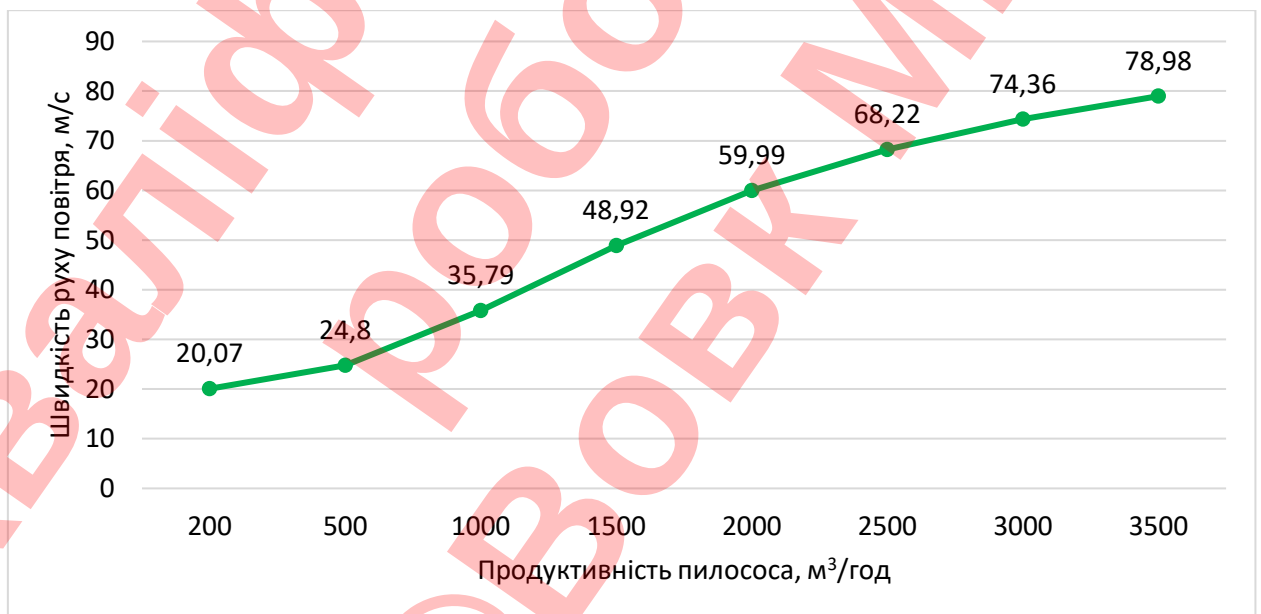


Рисунок 4.10 – Залежність середньої швидкості руху повітря від продуктивності пілососа

Визначено різницю розподілу тисків на поверхні деталі за різних значень продуктивності пілососа. Так, на діапазоні значень продуктивності $Q_{\pi}=200\dots1000$ м³/год різниця тисків суттєво не змінюється і лежить в межах

$\Delta P = 9364 \dots 9619$ Па, що свідчить про недостатню силу всмоктування повітря пирососом та необхідність підбору витяжної системи більшої потужності. На діапазоні значень $Q_{\pi} = 1000 \dots 3500$ м³/год різниця тисків зростає майже лінійно зі збільшенням потужності пирососа (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Залежність різниці тисків на поверхні деталі від продуктивності пирососа

Високі значення турбулентності теоретично мало б покращувати процес видалення стружки з поверхонь, однак в нашому випадку високі значення турбулентності спричинені високою об'ємною витратою на вході та низькою об'ємною витратою на виході з системи, що призводить до значних завихрень, але недостатнього видалення надлишкового повітря з внутрішнього простору щітки. Таким чином за середньою інтенсивністю турбулентності важко об'єктивно оцінити ефективність процесу видалення стружки.

З іншого боку – закономірно, що зі збільшенням середньої швидкості руху повітря зростає ефективність видалення стружки. Тобто, як бачимо з результатів інженерного аналізу, чим вища продуктивність пирососа, тим більша швидкість руху повітря і тим краще видалятиметься стружка з поверхні

верстата та оброблюваної деталі. Однак, збільшення продуктивності витяжної установки веде до збільшення фінансових витрат як під час закупівлі такого обладнання, так і під час його експлуатації.

Схожу ситуація з різницею розподілів тисків – чим вона більша, тим якісніший процес видалення стружки. Однак, бачимо, що така закономірність простежується лише для витяжних систем з продуктивністю вище 1500 м³/год.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що кількісними показниками охарактеризувати процес видалення стружки можна, але об'єктивно оцінити його ефективність важко. Тому варто співставити одержані кількісні показники процесу видалення стружки з траєкторіями потоків повітря, які одержані під час аналізу в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*.

Результати графічного відображення траєкторій руху повітря всередині системи в ізометричній проєкції для усіх розглянутих варіантів продуктивностей витяжної системи наведено на рис. 4.12.

Результати графічного відображення траєкторій руху повітря всередині системи на виді зверху для усіх розглянутих варіантів продуктивностей витяжної системи наведено на рис. 4.13.

Епюри розподілу тиску на поверхні деталі, що обробляється, для усіх розглянутих варіантів продуктивностей витяжної системи подано на рис. 4.14.

З урахуванням викладеного вище, варто розглядати варіанти продуктивностей витяжної системи від 1500 м³/год і вище. З рис. 4.13 бачимо, що за умови продуктивності витяжної системи 3000 м³/год та 3500 м³/год співвідношення швидкостей руху повітря на воду та виході з системи є оптимальними, однак завихрення за цих варіантів створюються таким чином, що потоки повітря не охоплюють всього об'єму внутрішнього простору системи. Це може призвести до налипання стружки та затримки її у кутах корпусу щітки.

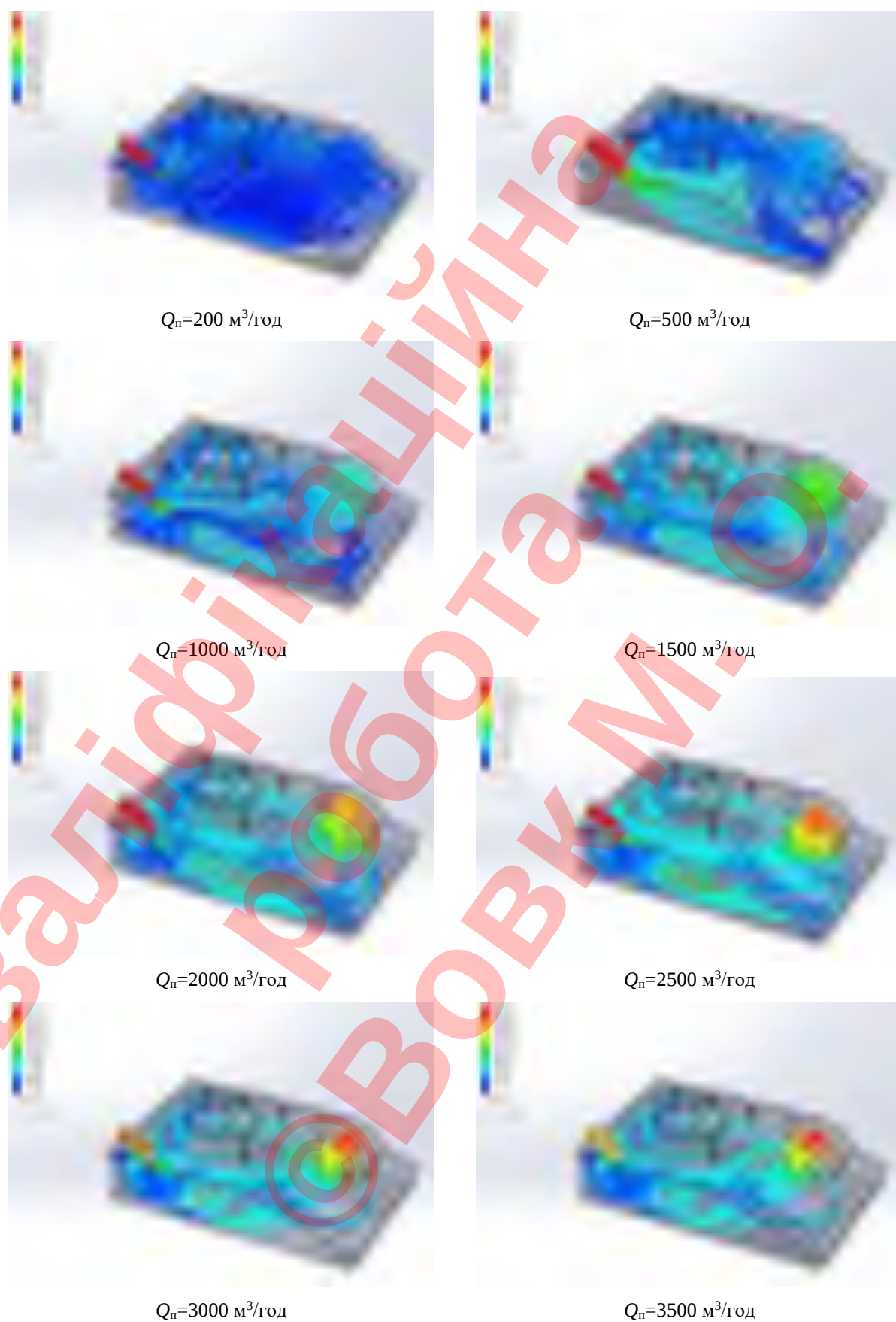


Рисунок 4.12 – Графічне відображення траєкторій руху повітря (ізометрична проєкція)

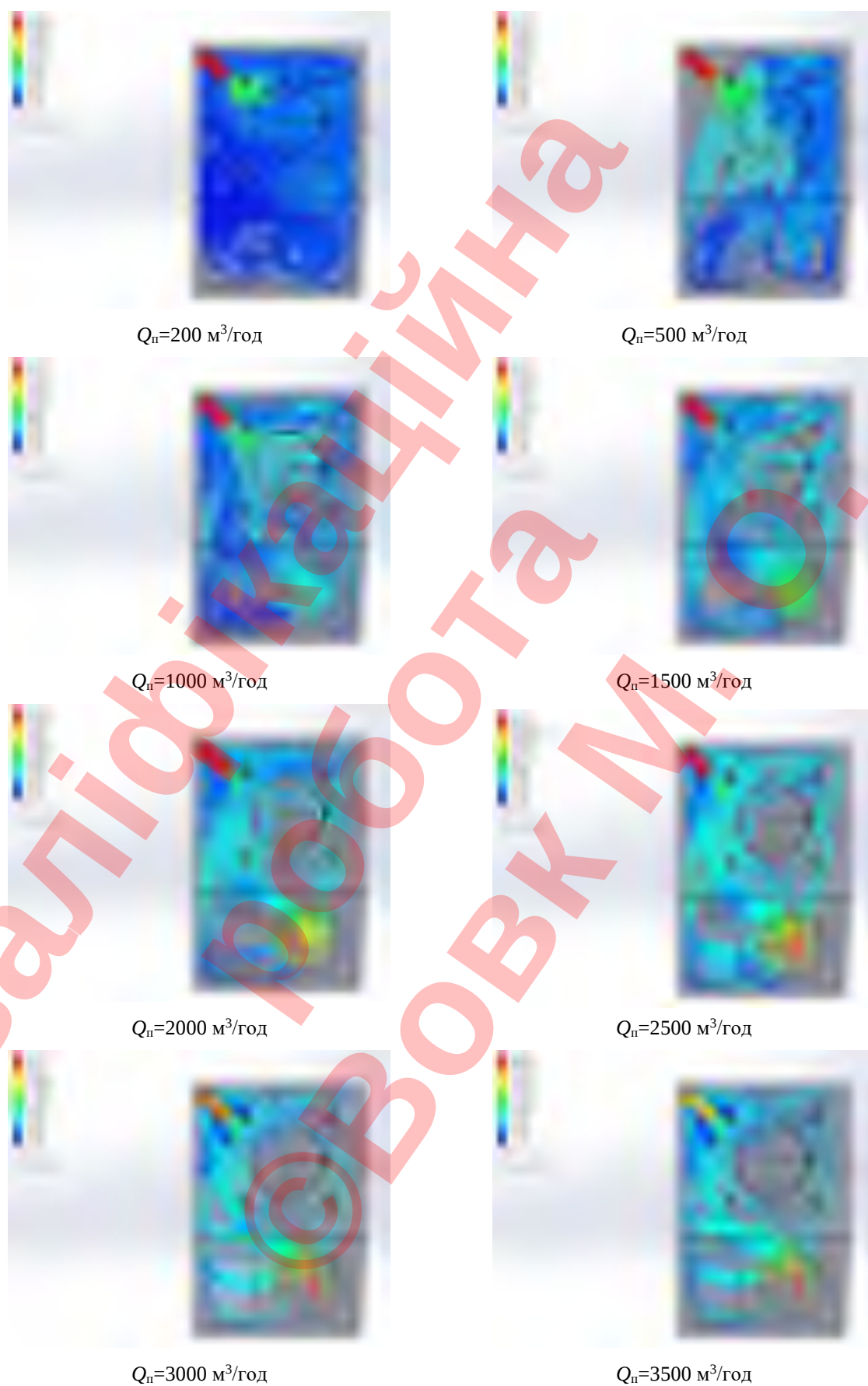


Рисунок 4.13 – Графічне відображення траєкторій руху повітря (вид зверху)

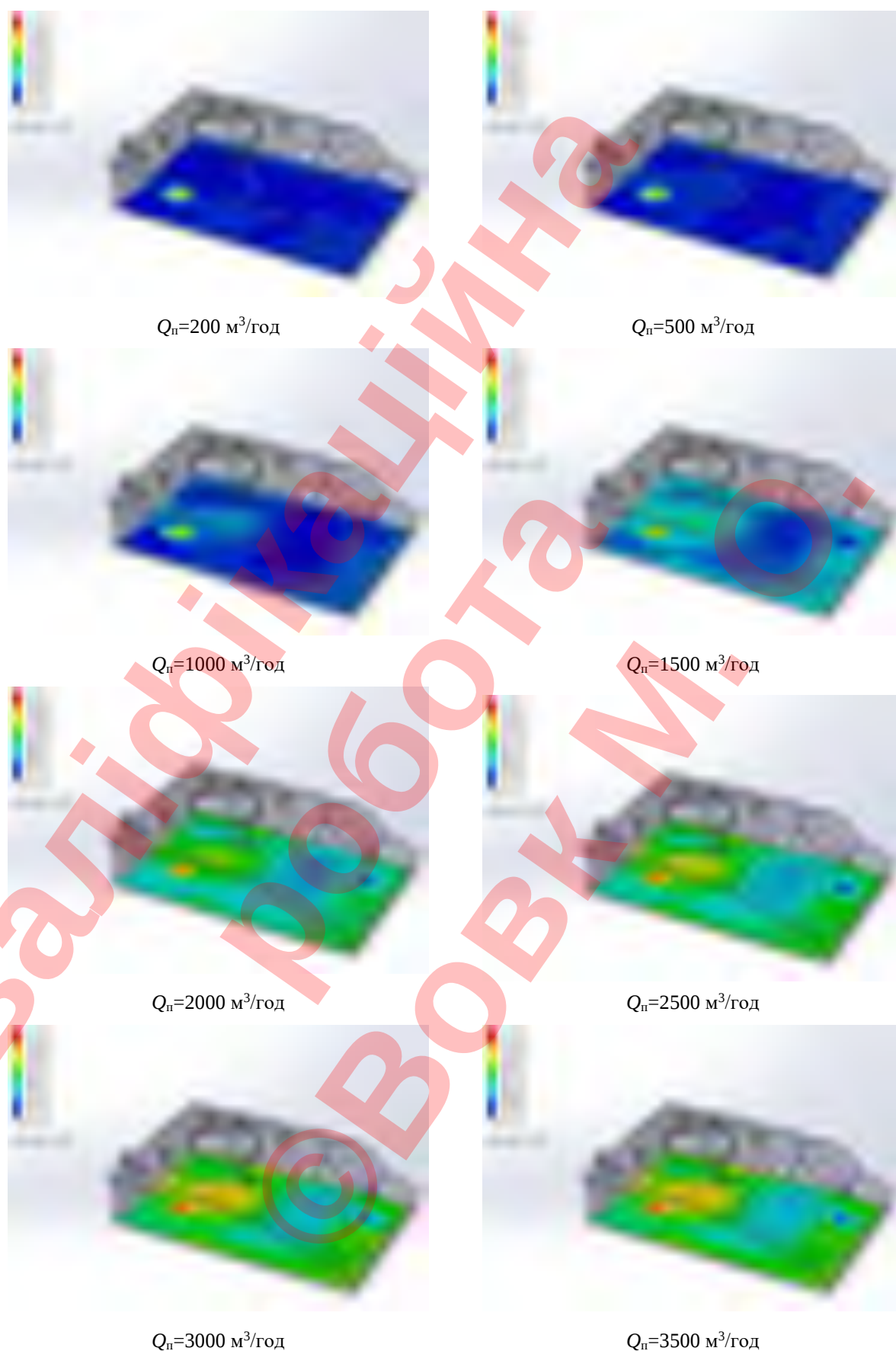


Рисунок 4.14 – Епюри розподілу тиску на поверхні деталі, що обробляється

Кращим варіантом, на наш погляд, є варіант з продуктивністю $Q_{\text{п}}=2000\dots2500 \text{ м}^3/\text{год}$. Саме за такого співвідношення $Q_{\text{к}}=2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$ та $Q_{\text{п}}=2000\dots2500 \text{ м}^3/\text{год}$ процес видалення стружки відбуватиметься найефективніше.

Аналіз епюр розподілу тисків (рис. 4.14) підтверджує припущення про те, що за значення продуктивності витяжної системи $Q_{\text{п}}=2000\dots2500 \text{ м}^3/\text{год}$ процес видалення стружки відбуватиметься найкраще з усіх розглянутих варіантів. При $Q_{\text{п}}=2500 \text{ м}^3/\text{год}$ в зоні різання область підвищеного тиску є дещо більшою, що сприятиме видуванню стружки із зони роботи ріжучого інструменту.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1. Загальні положення

5.1.1. Дія даної інструкції поширюється на всіх працівників, які працюють на металообробному обладнанні (токарні, фрезерні, свердлильні, заточувальні верстати тощо).

5.1.2. До виконання робіт на металообробному обладнанні (далі – верстати) допускаються особи віком не молодше 18 років, які пройшли медичний огляд, спеціальне навчання, мають посвідчення на право виконання робіт на верстатах, пройшли вступний інструктаж з охорони праці та первинний інструктаж на робочому місці та інструктаж на I групу з електробезпеки.

5.1.3. Працівники, що виконують роботи на верстатах (далі – верстатники), повинні один раз на 3 місяці проходити повторні інструктажі з питань охорони праці, а при виконанні разових робіт, безпосередньо не пов'язаних із посадовими обов'язками або обов'язками за спеціальністю, – цільовий інструктаж відповідно до характеру виконуваної роботи.

5.1.4. Не рідше одного разу на рік верстатники повинні пройти навчання і перевірку знань з питань охорони праці, пожежної безпеки та Правил безпечної роботи з інструментами і пристосуваннями.

5.1.5. Особа, яка виконує роботи на верстатах, перед допуском до самостійної роботи повинна пройти стажування протягом 2 – 15 змін (залежно від стажу, досвіду і характеру роботи) під керівництвом досвідченого кваліфікованого верстатника, який призначається розпорядженням керівника відповідного структурного підрозділу.

5.1.6. Верстатники повинні:

- виконувати тільки ту роботу, яка доручена йому керівником або передбачена посадовими чи робочими інструкціями;
- дотримуватися правил внутрішнього трудового розпорядку;

– дбати про особисту безпеку і здоров'я, а також про безпеку і здоров'я оточуючих людей в процесі виконання будь-яких робіт чи під час перебування на території університету;

– знати будову та правила технічної експлуатації верстатів, які експлуатуються;

– знати і виконувати вимоги правил пожежної безпеки, знати місця знаходження первинних засобів пожежогасіння та уміти ними користуватися;

– знати і виконувати вимоги нормативно-правових актів з охорони праці, вимоги санітарно-гігієнічних норм і правил, вміти надавати домедичну допомогу;

– користуватися засобами колективного та індивідуального захисту.

5.1.7. Палити та приймати їжу дозволяється тільки у спеціально відведених для цього місцях.

5.1.8. Працівник безоплатно забезпечується спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) відповідно до діючих Типових галузевих норм чи норм, передбачених Колективним договором.

5.1.9. Основними шкідливими та небезпечними виробничими факторами, які за певних обставин можуть призвести до травматизму чи професійних захворювань, є такі:

– підвищене фізичне навантаження; – підвищена запиленість повітря робочої зони;

– підвищені рівні шуму і вібрації;

– підвищена напруга електричної мережі;

– травмування рухомими частинами верстатів і матеріалами, що обробляються.

5.1.10. Працівник має право відмовитися від роботи, якщо умови її виконання створюють загрозу його здоров'ю або життю чи суперечать вимогам нормативних актів з охорони праці.

5.1.11. За порушення вимог цієї інструкції працівник несе адміністративну, дисциплінарну та карну відповідальність згідно діючого законодавства України.

5.2. Вимоги безпеки перед початком роботи

5.2.1. Перед початком роботи працівник зобов'язаний:

- одягти спецодяг, застебнути манжети рукавів, підготувати засоби індивідуального захисту, перевірити їх справність; спецодяг повинен бути наглухо застебнутий;
- отримати завдання на виконання робіт від керівника;
- підібрати інструмент, обладнання та технологічне оснащення, необхідні при виконанні робіт, перевірити їх справність і відповідність вимогам безпеки;
- оглянути і підготувати робоче місце та підходи до нього, прибрати все зайве, не заважаючи при цьому проходів, перевірити стан дерев'яного гратчастого настилу, підлоги на робочому місці, мокру або слизьку підлогу необхідно протерти.

5.2.2. Оглянути металообробні верстати, які будуть експлуатуватися. Вони повинні відповідати наступним вимогам безпеки:

а) верстати мають бути забезпечені зручними в експлуатації запобіжними пристосуваннями (екранами) з досить міцним склом або іншим прозорим матеріалом для захисту очей від стружки і частинок металу, які повинні бути заблоковані з пусковим пристроєм верстата, а конструктивно виконані так, щоб забезпечити зручну і швидку їх установку в необхідне положення. При неможливості (виходячи з технічних умов) застосування захисних пристроїв під час виконання робіт необхідно використовувати захисні щитки або окуляри;

б) всі доступні для доторкання струмопровідні частини електродвигунів повинні бути ізольовані, обгороджені або розташовуватися в місцях,

недоступних для випадкового їх торкання. Корпуси верстатів, електродвигунів і пускового обладнання повинні бути заземлені;

в) передачі (ремінні, ланцюгові, зубчасті тощо), розміщені поза корпусів верстатів, повинні мати огороження з пристроями для безпечного їх відкривання, переміщення і установки;

г) заготовки, які будуть оброблюватися на верстатах, повинні бути міцно і надійно закріплені;

д) всі виступаючі рухомі частини верстатів, що знаходяться на висоті до 2 м від підлоги, повинні надійно обгороджуватися;

е) всі верстати і механізми повинні мати пристрої, що запобігають попаданню в верстатника частинок оброблюваного матеріалу, що відлітає від різального інструменту та травмуванню верстатника при установці чи заміні різального інструменту;

ж) кожен верстат повинен мати надійно діючий гальмівний пристрій, що забезпечує його зупинку протягом 2–6 секунд з моменту відключення двигуна. Гальмо має бути заблокованим з пусковим пристроєм так, щоб виключити можливість спрацювання гальма при включеному двигуні;

и) верстати як з ручною, так і з механічною подачею, при роботі яких можливе викидання різальним інструментом заготовки та відходів від неї, повинні мати спеціальні пристрої, що виключають це викидання (зубчасті сектори, які заклинюються, кігті, загострені пальці, гребені, завіси, щитки тощо);

к) при обробці деталей на верстатах в шаблонах, останні забезпечуються надійними затискачами і рукоятками;

л) робочі поверхні напрямних столів, рейок, шаблонів повинні бути рівними, без вм'ятин, тріщин та інших дефектів.

5.2.3. Виявлені порушення вимог безпеки повинні бути усунуті до початку робіт. При неможливості усунення порушень власними силами, повідомити про них керівника робіт. До роботи приступати тільки після повного усунення виявлених порушень.

5.3. Вимоги безпеки під час роботи

5.3.1. Загальні вимоги.

5.3.1.1. Під час роботи працівник повинен:

- бути уважним, не відволікатися на сторонні справи та розмови, не відволікати інших працівників;
- постійно підтримувати чистоту та порядок на робочому місці, тримати в чистоті і справності всі вузли і механізми верстатів.

5.3.1.2. Стаціонарні і переносні верстати повинні приводитися в дію і обслуговуватися тільки тими особами, за якими вони закріплені. Забороняється допускати до роботи на верстатах сторонніх осіб.

5.3.1.3. При обробці на верстатах важких деталей і заготовок (понад 25 кг) їх установку та знімання необхідно проводити за допомогою вантажопідйомних механізмів.

5.3.1.4. Відключення верстата обов'язкове у разі припинення подачі струму, при зміні робочого інструменту, закріпленні або установці на ньому оброблюваного виробу та при зніманні його з верстата, а також при ремонті, очищенні та змащенні верстата, прибиранні пилу та стружки.

5.3.3. Металообробні верстати фрезерної групи.

5.3.3.1. В універсальних фрезерних консольних верстатах та верстатах з хрестовим столом завширшки 320 мм і більше, а також у всіх фрезерних верстатах з програмним керуванням операцію закріплення інструмента необхідно механізувати. Органи керування приводом для закріплення інструменту повинні бути зручно розташовані.

5.3.3.2. В універсальних фрезерних консольних верстатах та верстатах з хрестовим столом завширшки до 630 мм тривалість зупинення шпинделя (без інструмента) після його відключення не повинна перевищувати 6 с.

5.3.3.3. В горизонтально-фрезерних і вертикально-фрезерних верстатах заввишки до 2,5 м задня частина шпинделя разом з виступаючим кінцем гвинта для закріплення інструменту, а також виступаючий з підтримки кінець фрезерної оправки необхідно відгородити кожухами, які можна швидко зняти.

5.3.3.4. На вертикально-фрезерних верстатах для закріплення фрез необхідно застосовувати спеціальні механічні пристосування (шомполи, штрівелі тощо), і в конструкціях таких верстатів повинні передбачатись пристрої, що забезпечують зручний і безпечний доступ до зазначених пристосувань при зміні інструменту.

5.3.3.5. Конструкція збірних фрез повинна передбачати надійне та міцне закріплення в корпусі фрези зубів або пластин з твердого сплаву для запобігання випаданню їх під час роботи. Перед установкою фрези необхідно перевіряти цілісність та правильність заточування пластин. Пластини не повинні мати викришених місць, тріщин, припикання. Різальний інструмент не повинен мати затуплених кромки.

5.3.3.6. Для установки фрез на верстаті або заміни їх необхідно застосовувати спеціальні пристосування, які запобігають порізам рук.

5.3.3.7. У разі установлення фрез на оправку їх зуби необхідно розміщувати в шаховому порядку.

5.3.3.8. Для підтримування фрези під час її вибивання зі шпинделя необхідно застосовувати еластичні прокладки. Забороняється підтримувати фрезу незахищеною рукою.

5.3.3.9. Фрезерну оправку або фрезу необхідно закріплювати в шпинделі ключем тільки після включення коробки швидкостей для запобігання провертання шпинделя. Забороняється затискати і віджимати фрезу ключем на оправці вмиканням електродвигуна, а також залишати ключ на головці затяжного болта після установки фрези або оправки.

5.3.3.10. Після установки і закріплення фрези необхідно перевіряти радіальне і торцеве биття, яке не повинно перевищувати 0,1 мм.

5.3.3.11. Копіювальні, свердлильно-фрезерні та фрезерні верстати повинні мати кінцеві вимикачі для здійснення вимикання фрезерних та свердлильних кареток в установлених положеннях.

5.3.3.12. При швидкісному фрезеруванні необхідно застосовувати огороження та пристосування для уловлювання та видалення стружки

(спеціальні стружковідвідники, що вловлюють і відводять стружку в стружкозбірник), прозорі екрани або індивідуальні засоби захисту (окуляри, щитки).

5.3.3.13. Привід до бабки різбофрезерних верстатів повинен бути огороженим.

5.3.3.14. Оброблювані деталі та пристосування, особливо базові та кріпильні поверхні, які торкаються одна одної, перед установкою на верстат необхідно очищати від стружки і масла для забезпечення правильної установки їх і досягнення міцності закріплення.

5.3.3.15. Отвір шпинделя, хвостовик оправки або фрези, поверхню перехідної втулки перед установкою в шпиндель необхідно ретельно очистити і протерти, а забоїни – усунути. При установці хвостовика інструменту в отвір шпинделя хвостовик повинен сідати щільно, без люфту.

5.3.3.16. Оброблювану деталь необхідно закріплювати в місцях, що знаходяться якомога ближче до оброблюваної поверхні. Для закріплення деталей до необроблених поверхонь необхідно застосовувати лещата та пристосування з насічкою на притискних губках.

5.3.3.17. При використанні для закріплення деталей пневматичних, гідравлічних та електромагнітних пристосувань, трубки, по яких подається повітря або рідина, а також електричну проводку необхідно оберегати від механічних пошкоджень.

5.3.3.18. У разі заміни або вимірювання оброблюваної деталі верстат необхідно зупинити, а різальний інструмент відвести від неї на безпечну відстань.

5.3.3.19. Працювати на верстаті з необгородженою фрезою необхідно із застосуванням індивідуальних засобів захисту (окулярів, щитків тощо).

5.3.3.20. Під час роботи на верстаті слід уникати скупчення стружки на фрезі та оправці.

Стружка від обертової фрези повинна періодично видалятися пензликом, що має ручку завдовжки до 250 мм.

5.4. Вимоги безпеки після закінчення роботи

5.4.1. Відключити верстат від джерела електроенергії.

5.4.2. Видалити стружку з верстата, використовуючи відповідні пристосування (гачки, щітки). Прибирати стружку руками забороняється. Не допускається скупчення стружки в робочих проходах.

5.4.3. Зняти спецодяг і спецвзуття, очистити його від пилу та іншого бруду і покласти у відведене для зберігання місце та переодягтися. Вимити обличчя і руки теплою водою з милом або прийняти душ.

5.4.4. Доповісти керівнику про виявлені під час роботи недоліки.

5.5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.5.1. В процесі роботи можуть виникнути наступні аварійні ситуації:– загоряння обладнання або матеріалів, виникнення пожежі;

- пошкодження ізоляції електрообладнання, виникнення напруги дотику та крокової напруги;
- заклинювання рухомих частин обладнання;
- розрив частин механізмів, що рухаються або обертаються;
- виліт матеріалів, що обробляються.

5.5.2. У разі виникнення аварійної ситуації необхідно:

- обгородити небезпечну зону і не допускати в неї сторонніх осіб; якщо обстановка не загрожує життю і здоров'ю працівників і не призведе до більш тяжких наслідків, необхідно її зберегти такою, якою вона була на момент настання події, для проведення розслідування;
- при пожежі приступити до її ліквідації; якщо погасити пожежу своїми силами неможливо, викликати пожежну команду;
- повідомити про те, що сталося, керівника робіт.

5.5.3. У разі настання нещасного випадку:

- негайно звільнити потерпілого від дії вражаючого фактору;
- перенести його в безпечне місце;

– визначити стан потерпілого, при необхідності надати йому домедичну допомогу, а у тяжких випадках викликати екстрену медичну допомогу.

5.5.4. При ліквідації аварійної ситуації виконувати вказівки керівника робіт []

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

Проаналізувавши стан питання стосовно процесів та засобів для видалення стружки на фрезерних верстатах, можна зробити висновок про те, що, всі представлені в роботі системи і пристрої безумовно виконують свої функції, якісь менше, якісь більше, але в основному вони всі вузьконаправленого типу, або тільки працюють з певними оброблюваними матеріалами, або їх можна застосовувати тільки на певних пристроях, чи в певних умовах.

Встановлено, що для інженерного аналізу технічних рішень існує чотири типи програм, а саме:

- програмні системи проектування;
- універсальні програми аналізу на основі методу кінцево-елементного аналізу (*FEA*);
- спеціалізовані програми аналізу, для дослідження динамічних процесів, що протікають у системах автоматичного регулювання та управління;
- програми аналізу систем управління.

Для аналізу роботи пристрою для видалення стружки та пилу на металообробних верстатах доцільно використовувати систему *SOLIDWORKS Flow Simulation*, яка дозволяє виконувати аналіз гідрогазодинамічних процесів.

В роботі запропоновано пристрій видалення стружки з поверхонь металообробних верстатів та деталей, що обробляються, який входить у систему, що складається з пристрою (щітки), компресора поршневого ВКП W2200 10-500 (HD), шланга для підключення компресора до щітки, витяжної установки (пилососа промислового для стружки), гофрованого рукава для під'єднання установки до щітки та хомута. З використанням САПР *SOLIDWORKS* спроектовано щітку, підготовлено до інженерного аналізу її модель.

В середовищі *SOLIDWORKS Flow Simulation* здійснено інженерний аналіз розробленої системи, який полягав у імітаційному моделюванні

процесу подачі повітря через вхідний патрубок та відсмоктування повітря витяжною системою. Дослідження проведено в діапазоні зміни продуктивності витяжної системи $Q_{\text{п}}=200\dots3500 \text{ м}^3/\text{год}$ за постійного значення продуктивності компресора $Q_{\text{к}}=2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$.

За результатами проведеного аналізу встановлено значення середніх швидкостей руху повітря, середньої інтенсивності турбулентності в просторі щітки та побудовано епюри розподілу тисків на поверхні деталі, що обробляється. Також побудовано траєкторії руху повітря у внутрішньому просторі щітки.

На підставі одержаних результатів зроблено висновок про те, що кількісними показниками охарактеризувати процес видалення стружки можна, але їх недостатньо для об'єктивної оцінки його ефективності. Тому одержані кількісні показники процесу видалення стружки співставлено з траєкторіями потоків повітря, які одержані під час аналізу в середовищі *SolidWorks Flow Simulation*. На основі співставлення кількісних показників процесу з графічним відображенням руху повітря у просторі щітки встановлено, що, на наш погляд, є процес видалення стружки відбуватиметься найефективніше за значення продуктивності витяжної системи $Q_{\text{п}}=2000\dots2500 \text{ м}^3/\text{год}$. за умови продуктивності компресора $Q_{\text{к}}=2,2 \text{ м}^3/\text{хв}$.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Виговський Г.М., Балицька Н.О., Глембоцька Л.Є, Мельник О.Л. Теорія різання: Навчальний посібник. – 2-ге вид., доп. /– Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2021. – 148 с.
2. Городецький І., Тимочко В., Магац М. та ін. Аналіз стану виробничого травматизму як передумова управління процесами формування небезпечних подій. *Вісник Львівського НУП. Серія Агроінженерні дослідження*. Львів, 2023. № 27. С.127–137. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
3. Колодій О.С., Кюрчев С.В., Сушко О.В., Ковальов О.О. «Автоматичне управління процесами обробки металів різанням»: Методичний посібник з виконання лабораторних робіт. Мелітополь: ТПЦ «Forward press», 2020. С. 136.
4. Паливода Ю. Є., Ткаченко І. Г., Капаціла Ю. Б., Гевко Ів. Б. Технологія оброблення корпусних деталей : навч. посіб. – Тернопіль: ТНТУ, 2016. – 156 с.
5. Пістун І. П., Березовецький А. П., Тимочко В.О., Городецький І. М. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. І. Львів: Тріада плюс, 2017. 620 с.
6. Пістун І. П., Тимочко В.О., Городецький І. М., Березовецький А. П. Охорона праці (гігієна праці та виробнича санітарія): навч. посібн. / за ред. І.П.Пістуна. Ч. II. Львів: Тріада плюс, 2015. 224 с.
7. Пістун І.П., Березовецький А.П., Городецький І.М. Охорона праці на автомобільному транспорті: *навч. посіб.* Львів: Тріада плюс, 2009. 320 с.
8. Стискін Г.М. Технологічні основи програмування обробки деталей на верстатах з числовим програмним керуванням / Г.М. Стискін, М.П. Ревнівцев, М.М. Берізко, В.Д. Гаєвський, — Л.: Оріяна-Нова, 2002. – 208 с.
52. Стискин Г.М. Технологія токарної обробки / Г.М. Стискин, М.П. Ревнівцев, В.А. Мелещик — К.: Либідь, 1998. – 176 с.

9. Стукалець І. Г. Основи інженерного аналізу технічних об'єктів. Курс лекцій для студентів інженерних спеціальностей. Львів : ЛНУП, 2022. – 109 с.
10. Технологія верстатних робіт: навч. пос. для проф.-техн. навч. закладів / М. А. Вайнтрауб, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов, за наук. ред. М. А. Вайнтрауба. – К. : 2015. – 199с.
11. Тимочко, В., Городецький І., Бурнаєв О. та ін. Оцінка професійного ризику працівників під час обслуговування та ремонту електричного обладнання. *Вісник Львівського НАУ. Серія Агроінженерні дослідження*. 2024. №28. С. 227–235. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2023.27.127>.
12. Dmytriv, V., Dmytriv, I., Horodetskyi, I., Hutsol, T., Kukharets, S., Cesna, J., Bleizgys, R., Pietruszynska, M., Parafiniuk, S., Kubon, M., & Horetska, I. (2024). A Method for Simulating the Positioning Errors of a Robot Gripper. *Applied Sciences*, 14(14), 6159. <https://doi.org/10.3390/app14146159>.
13. Horodetskyi I. et al. Method of theory of dimensions in experimental research of systems and processes. *INMATEH-Agricultural Engineering*. Volume 65, No. 3. 2021. P. 233-240. DOI: <https://doi.org/10.35633/inmateh-65-24>.
14. Munoz-Escalona P., Shokrani A., Newman S.T. Influence of cutting environments on surface integrity and power consumption of austenitic stainless steel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2015, vol. 36, pp. 60–69.
15. Paul M. Kurowski. Thermal Analysis with SolidWorks Simulation 2016 and Flow Simulation 2016. Publisher Stephen Schroff. 2015. – 290.
16. Довідка SolidWorks. URL : https://help.solidworks.com/2022/english/SolidWorks/sldworks/r_welcome_sw_online_help.htm (дата звернення: 9.10.2025).
17. Dassault Systèmes. URL: <https://www.3ds.com> (дата звернення 9.10.2025).
18. SolidWorks. URL: <https://www.solidworks.com> (дата звернення 9.10.2025).
19. SolidWorks. URL: https://www.softkey.ua/catalog/sapr/solidworks/#detail_text (дата звернення 9.10.2025).