

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Модернізація сепаратора турбінного типу з розробкою
аспіраційної системи»

Виконав здобувач вищої освіти IV курсу,
групи ГМ-22-1

ОПП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Турта Дмитро Васильович

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Дмитро ПЕТРЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

професор, д-р техн. наук

_____ Микола МОРОЗ

« ____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Анотація

Тема: «Модернізація сепаратора турбінного типу з розробкою аспіраційної системи»

У роботі проведено аналіз та вдосконалення пневмосепараторів із кільцевим робочим каналом. Розроблено оригінальну конструкцію з осьовим підведенням повітря, що ліквідує «затінені» зони та забезпечує ідеальну радіальну симетрію потоку. Впроваджено перфорацію розподільника для попереднього фракціонування суміші. На основі розрахунків для продуктивності 30 т/год визначено оптимальні параметри: швидкість повітря 6,5 м/с та діаметр каналу 280 мм. Запропоноване рішення підвищує чіткість розділення фракцій та мінімізує втрати якісного насіннєвого матеріалу.

Ключові слова: пневмосепарація, кільцевий канал, очищення зерна, конус-розподільник, аеродинаміка

Abstract

Topic: «Modernization of a turbine-type separator with the development of an aspiration system»

The paper analyzes and improves pneumatic separators with an annular working channel. An original design with axial air supply is developed, which eliminates "shadow" zones and ensures ideal radial symmetry of the flow. Perforation of the distributor is implemented for preliminary fractionation of the mixture. Based on calculations for a capacity of 30 t/h, optimal parameters were determined: air velocity of 6.5 m/s and a channel diameter of 280 mm. The proposed solution increases the accuracy of fraction separation and minimizes the loss of high-quality seed material.

Keywords: pneumatic separation, annular channel, grain cleaning, distribution cone, aerodynamics

Зміст

Номер розділу	Структурна одиниця і розділ	Сторінка
1	Вступ	
2	Аналіз зерноочисних пневмосепараторів з кільцевим перерізом пневмосепараційного каналу	
3	Конструкторська частина	
4	Загальні висновки	
-	Список використаної літератури	
-	Додатки	

1. ВСТУП

У сучасному агропромисловому комплексі боротьба за рентабельність ведеться не лише на полях, а й у площині технологічної досконалості післязбиральної обробки. В цьому контексті пневмосепарація є однією з основ зерноочисних ліній, яка потребує нових техніко-технологічних рішень, зважаючи на зростаючі вимоги до споживчої якості зернових матеріалів. Стандартні рішення минулих десятиліть вичерпали свій ресурс ефективності, поступаючись місцем системам з принципово новою аеродинамікою [1, 10].

Зерноочисні пневмосепаратори з кільцевим перерізом пневмосепараційного каналу (далі КПК) є самостійним класом аспіраційного обладнання, де зерновий матеріал обтікається повітряним потоком у замкненому або відкритому кільцеподібному просторі між двома співвісними тілами обертання. Така геометрія принципово відрізняється від традиційних плоских аспіраційних каналів, що застосовуються, наприклад, у зерноочисних машинах типу БСХ чи ЗСМ: замість одного прямокутного перерізу зерновий шар утворює кільцеву завісу навколо центрального розподільного тіла, а повітряний потік охоплює матеріал рівномірно по всьому периметру [1-8].

Апарати з КПК набули поширення у виробничих лініях зернозберігальних підприємств, елеваторів і насінневих заводів насамперед завдяки здатності забезпечувати значну питому продуктивність на одиницю площі поперечного перерізу корпусу. Однак практика виявила суперечливу картину, оскільки декларовані показники нерідко суттєво розходяться з реальними результатами в умовах змінної вологості та засміченості зернової маси [2, 8, 10].

Мета цієї роботи – провести критичний аналіз конструктивних рішень,

					ТПС 00.000 ПЗ			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Турта				Пояснювальна записка		Літ.	Аркуш
Перевірив	Петренко							Аркушів
Н. контр.	Артеменко						ЦНТУ, гр. ГМ-22-1	
Затверд.	Васильковський							

класифікувати апарати даного типу за ключовими ознаками, оцінити реальні характеристики представницьких марок, що перебувають в комерційній експлуатації, та окреслити перспективні напрями вдосконалення.

2. АНАЛІЗ ЗЕРНООЧИСНИХ ПНЕВМОСЕПАРАТОРІВ З КІЛЬЦЕВИМ ПЕРЕРІЗОМ ПНЕВМОСЕПАРАЦІЙНОГО КАНАЛУ

2.1. Класифікація пневмосепараторів з КПК

Різноманіття конструктивних рішень, реалізованих різними виробниками, зумовлює потребу у систематизації за кількома незалежними ознаками.

1. За принципом організації повітряного потоку:

– висхідний кільцевий потік (вертикальна КПК). Повітря нагнітається або відсмоктується знизу вгору крізь кільцеву щілину між зовнішнім корпусом і центральним розподільним тілом (конусом або циліндром). Зернова маса подається зверху, розсипається по конусу і у вигляді кільцевої завіси опускається назустріч повітряному потоку. Принцип реалізовано у СВО-1 (ТОВ «ОЛІС», Україна) та Kongskilde KF-серії (Данія) [6, 7];

– горизонтальний дисковий потік із кільцевою щілиною (осьова подача). Зерно надходить зверху на обертовий або нерухомий диск-розподільник, що розкидає матеріал у горизонтальній площині через кільцеву щілину; повітряний потік проходить крізь падаючу кільцеву завісу зерна у горизонтальному або злегка похилому напрямку. Цей принцип покладений в основу DAMAS PULCO (Skiold Damas A/S, Данія) [5];

– комбінований (радіально-висхідний) потік. Два незалежних повітряних контури – вертикальний і радіальний, об'єднані в одному корпусі. Ступінь вертикального потоку відокремлює великі легкі домішки, ступінь радіального

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– дрібний пил і биті зернівки. Такий підхід використовується в деяких патентованих рішеннях, що розвиваються з базових конструкцій ОЛІС [7].

2. За геометрією перерізу кільцевого каналу:

–циліндро-конічний (зовнішній корпус – циліндр, внутрішнє тіло – конус). Найпоширеніша схема. Конус спрямовує матеріал до периферії та формує рівномірну кільцеву завісу. Застосовується у СВО (ОЛІС), Kongskilde KF-12/20/40/60 [2, 6, 7];

–подвійно-конічний (біконічний) переріз. Зовнішній корпус звужується донизу, а центральне тіло – розширюється донизу. Це стабілізує швидкість повітряного потоку по висоті. Схема характерна для ряду модифікацій DAMAS PULCO-S (з вертикальною повітряною камерою-насадкою) [2, 5];

–дисково-кільцевий горизонтальний переріз. Матеріал рухається радіально від центрального диска через горизонтальну кільцеву щілину. Профіль перерізу – плоский кільцеподібний. Принцип застосований у базовому виконанні DAMAS PULCO без вертикальної камери [5].

3. За циклом використання повітря:

–замкнений цикл – відпрацьоване повітря після відокремлення домішок у циклоні або осадовій камері повертається на вхід вентилятора, не викидаючись у приміщення. Перевага – незалежність від аспіраційної системи підприємства, відсутність тиску в будівлі;

–відкритий (незамкнений) цикл – аспіраційне повітря з домішками відводиться в загальну аспіраційну мережу підприємства та надходить до фільтраційної установки. Характерно для СВО-1, Kongskilde KF, DAMAS PULCO у стандартному виконанні.

4. За способом подачі зернового матеріалу:

–гравітаційна подача на нерухомий конус-розподільник;

–примусова рівномірна подача через обертовий диск-розподільник зі стабілізатором шару – реалізована у DAMAS PULCO, СВО-1 від «ОЛІС» де

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внутрішній диск забезпечує гарантовану рівномірність кільцевої завіси незалежно від витрати матеріалу;

–вібраційна подача через кільцевий жолоб – варіант, що використовується в деяких конструкціях Kongskilde KF для забезпечення рівномірної подачі при підвищеній вологості.

2.2. Критичний аналіз сепараторів

Повітряний сепаратор СВО-1 ТОВ «ОЛІС» (рис. 2.1) є найбільш розповсюдженим вітчизняним представником класу КПК [7]. Машина широко застосовується на елеваторах, млинах і крупозаводах України в парі із ситовими сепараторами серії «Горизонт-К» того ж виробника.

Конструктивна схема. Зерно надходить зверху на рухомий розподільник і у вигляді рівномірної кільцевої завіси опускається в повітряний канал між зовнішнім циліндричним корпусом і розподільним конусом. Знизу крізь ту ж щілину піднімається висхідний повітряний потік, що виносить легкі домішки у верхню частину апарату і далі – до циклону.

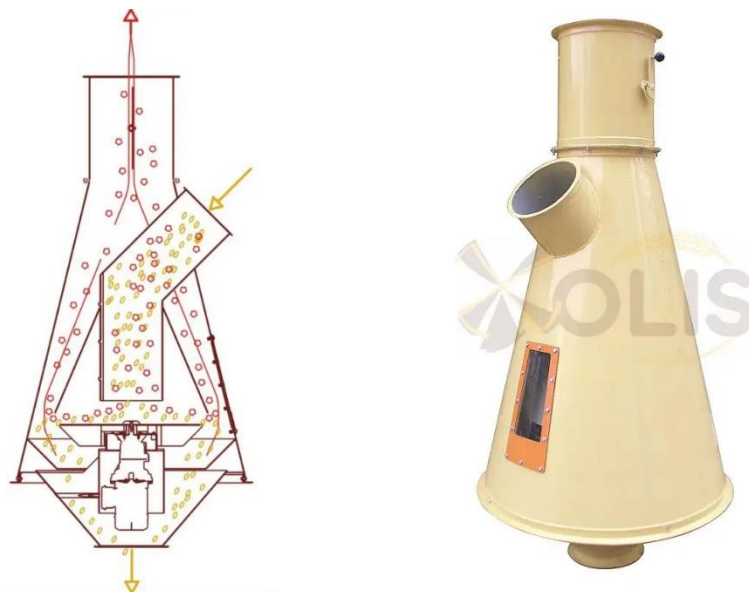


Рис. 2.1. Функціональна схема та вигляд загальний сепаратора з КПК від ТОВ «ОЛІС» [7]

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Головний конструктивний недолік даного сепаратора – фіксована геометрія кільцевої щілини без засобів оперативного регулювання її ширини. Оскільки оптимальна швидкість повітряного потоку в каналі залежить від культури, вологості і гранулометричного складу зерна, фіксований зазор є компромісним рішенням, що не дозволяє досягти оптимуму при зміні умов роботи. Відомі також технологічні обмеження: при вологості зернової маси понад 18...20 % на поверхні конуса і нижній частині зовнішнього корпусу накопичуються відкладення вологих дрібних фракцій, що з часом звужують ефективний переріз каналу і порушують рівномірність повітряного поля. Виробник рекомендує в таких умовах скорочувати навантаження до 70...80 % від номінального, що знижує фактичну питому продуктивність.

Аспіратор PULCO (рис. 2.2) данської компанії Damas (нині у складі групи SKIOLD) є одним із найбільш оригінальних конструктивних рішень серед апаратів з КПК.

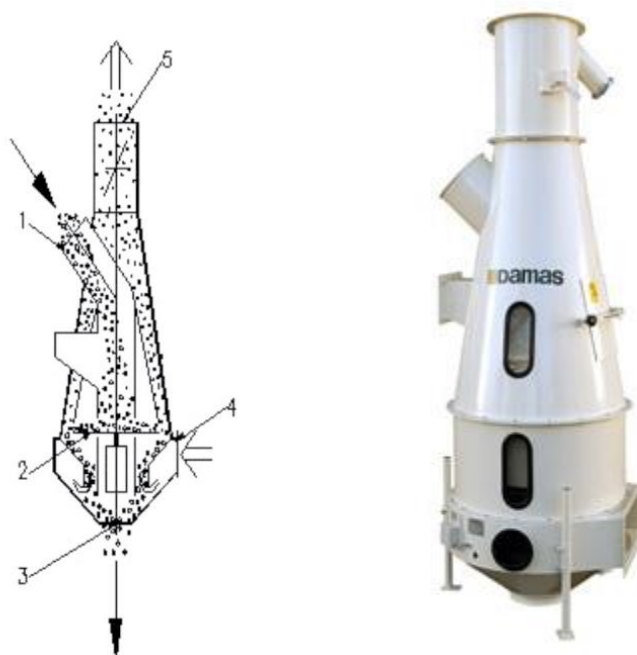


Рис. 2.2. Аспіраційний сепаратор з КПК DAMAS PULCO [5]

Принцип дії принципово відрізняється від більшості конкурентів. Процес сепарації та переміщення матеріалу в установці здійснюється за

наступним алгоритмом (рис. 2.2). Вихідна сировина надходить через завантажувальний патрубок (1) на механічний розподільник (2). Завдяки обертовому моменту привода розподільник формує рівномірний кільцевий завіс матеріалу, що подається у зону сепарації.

Матеріал проходить крізь вертикальний висхідний повітряний потік. Вентилятор створює розрідження, втягуючи повітря через вхідний отвір (4). У цій зоні відбувається розділення фракцій за парусністю: важкі частинки (очищене зерно) під дією гравітації опускаються до нижнього вивантажувального отвору (3), а легкі домішки підхоплюються повітряним потоком.

Винесені повітрям домішки транспортуються через вентилятор до циклона (5), де внаслідок відцентрових сил відбувається їх осадження. Конструкція передбачає два режими експлуатації аспіраційної системи: розімкнений цикл – відпрацьоване повітря після циклона викидається в атмосферу; замкнутий цикл (рециркуляція) – повітря повертається через сполучний патрубок до впускного отвору (4). Для запобігання накопиченню дрібнодисперсного пилу в системі передбачено відведення частини потоку на фільтрувальну установку.

Модифікація PULCO-S отримала вертикальну додаткову повітряну камеру, що встановлюється як насадка над основним блоком. Завдяки збільшеному часу перебування легких частинок у повітряному потоці PULCO-S здатен видаляти більш дрібні домішки без ризику захоплення повноважного зерна, що особливо важливо при сепарації дрібнонасінних культур – ріпаку, льону, різних трав.

Ключова конструктивна перевага – диск-розподільник з гарантованим рівномірним розподілом матеріалу по периметру незалежно від витрати. Традиційні конуси-розподільники чутливі до нерівномірного живлення: локальне перевантаження одного сектора порушує рівномірність повітряного поля. Дисковий механізм PULCO усуває цей недолік. Відсутність вібрації –

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

важлива перевага для монтажу в конструкціях з обмеженою несучою здатністю перекриттів (надсиносні поверхи елеваторів). Машина виробляє мінімальний шум і потребує малої потужності відносно продуктивності.

Критичні зауваження. Горизонтальний принцип дії зумовлює обмежений час контакту зерна з повітряним потоком порівняно з вертикальними апаратами – ефективна зона сепарації коротша. Для культур зі складним гранулометричним складом або підвищеним вмістом важких домішок (пошкоджені зернівки, мінеральні включення) одноступенева горизонтальна схема може бути недостатньою. Підключення до зовнішньої аспіраційної системи є обов'язковим (апарат не автономний), що ускладнює монтаж на підприємствах зі старою мережею. У стандартній конфігурації відсутній частотний перетворювач вентилятора, тому регулювання режиму здійснюється заслінкою – дискретно й неточно.

Данська компанія Kongsild (Industries A/S) пропонує серію аспіраторів-попередньоочишувачів KF як модульне рішення для інтеграції в нові та наявні зернові лінії [6]. Модельний ряд включає KF-12, KF-20, KF-40 та KF-60 (рис. 2.3), де цифри вказують на орієнтовну продуктивність у тоннах на годину для пшениці. Для великих промислових об'єктів випускаються моделі KFP-80 та KFP-120.

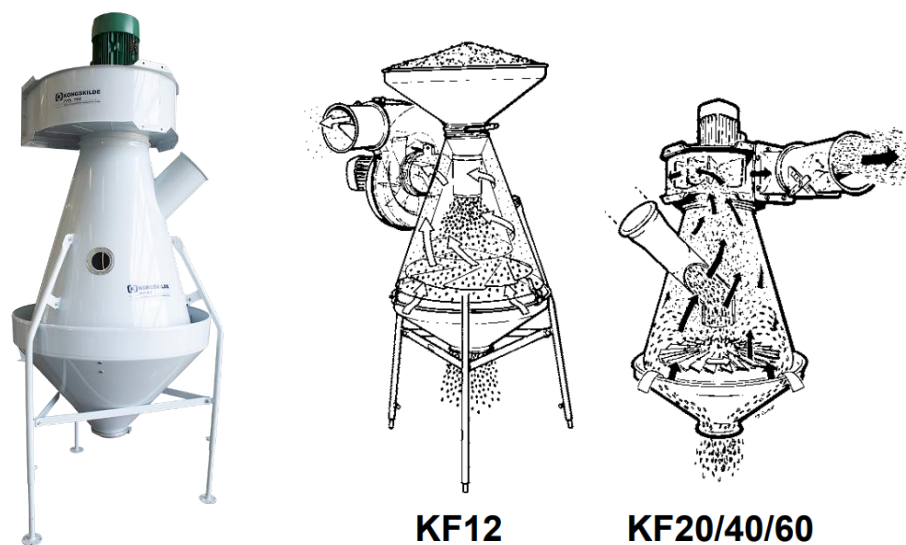


Рис. 2.3. Загальний вигляд і схеми сепараторів KF (Kongsild) [6]

					ТПС 00.000 ПЗ		Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Конструктивна схема. Зерно надходить на центральний конус-розподільник і опускається кільцевою завісою назустріч висхідному повітряному потоку, форма конуса та геометрія перехідної зони між конусом і зовнішнім корпусом оптимізовані для забезпечення більш рівномірного кільцевого потоку. Особливістю серії є модульна конструкція корпусу, що дозволяє встановити апарат між секціями норій, шнеків або пневматичних транспортерів без додаткових перехідників, використовуючи стандартні трубні компоненти Kongskilde.

Позитивна критична оцінка. Модульність і стандартизація з'єднувальних елементів – найбільша практична перевага серії KF. На підприємствах, де вже змонтовані пневматичні транспортні системи Kongskilde, інтеграція KF є максимально простою і швидкою. Можливість встановлення апарату як на вході до сховища, так і на виході, дозволяє організувати двоетапне очищення без суттєвих капіталовкладень. Широкий діапазон продуктивності (від 12 до 120 т/год) дозволяє підібрати оптимальну модель під конкретний об'єкт.

Критичні зауваження. Конструкція KF орієнтована насамперед на попереднє очищення – видалення великих і середніх легких домішок (солома, полова, стебла). Для тонкого очищення насінневого матеріалу з видаленням дрібного пилу і биття серія KF без додаткового циклонного або рукавного модуля виявляється недостатньою. Регулювання режиму здійснюється зміною положення ручної заслінки на трубопроводі, що є технологічно примітивним рішенням для сучасного автоматизованого виробництва. Відсутній вбудований датчик об'ємної витрати повітря, тобто оператор позбавлений зворотного зв'язку про фактичний аеродинамічний режим. Ефективність KF різко знижується при перевантаженні: навіть короточасне (3...5 хв) збільшення витрати зерна понад 120 % від номінального призводить до «захаращення» кільцевої щілини і практичного припинення аспірації.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2.3. Зведений аналіз переваг і недоліків

Загальні переваги класу апаратів з КПК:

- висока питома продуктивність на одиницю площі перерізу – кільцева геометрія забезпечує значно більший периметр активної зони сепарації порівняно з прямокутним плоским каналом аналогічної площі, що дозволяє суттєво підвищити продуктивність в тому самому габариті;
- рівномірний розподіл матеріалу (в ідеальних умовах) – конічний або дисковий розподільник теоретично забезпечує однорідну кільцеву завісу зерна, усуваючи «мертві зони», притаманні плоскому каналу;
- осьова симетрія та відсутність вібрації – апарати, де рухомі частини збалансовані (DAMAS PULCO), не передають динамічних навантажень на несучі конструкції і значно тихіше працюють;
- компактність при значній продуктивності – невелика площа підлоги при великій продуктивності – суттєва перевага при щільному плануванні виробничого поверху елеватора;
- легка інтеграція в технологічні лінії;
- широкий типорозмірний ряд – більшість виробників пропонують не менше 4–6 типорозмірів (н-д, KF-12 ... KFP-120), що дозволяє точно підібрати апарат під конкретний потік.

Недоліки та системні обмеження:

- нерівномірність кільцевої щілини на практиці – виробничі допуски на виготовлення конусу і зовнішнього корпусу неминуче призводять до відхилення ширини щілини по периметру;
- відсутність автоматичного регулювання режиму в масовому сегменті – переважна більшість серійних апаратів не оснащені частотними перетворювачами або датчиками швидкості повітря, оператор регулює режим ручною заслінкою за зовнішнім виглядом зерна на виході, що є суб'єктивним і ненадійним методом;
- чутливість до підвищеної вологості – при вологості зерна понад 18 %

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

і, особливо, при наявності зелених рослинних домішок стінки каналу і поверхня конусу залипають, кільцева щілина поступово звужується, і апарат переходить у режим «псевдозасмічення», коли продуктивність падає без видимих зовнішніх ознак;

– обмежена ефективність при тонкодисперсних домішках – мінеральний пил (частинки менше 50 мкм) і мікроскопічні фрагменти зерна не затримуються в осадовій камері апарату без додаткового циклону або рукавного фільтру;

– складність технічного обслуговування внутрішнього конусу – для огляду і ремонту розподільного конусу необхідне часткове розбирання апарату;

– залежність від якості подачі – навіть короточасне перевантаження понад 120 % від номінального призводить до захаращення кільцевої щілини і фактичного припинення сепарації, оскільки надлишок зерна «перекриває» кільцевий канал і апарат перетворюється на простий жолоб.

2.4. Перспективні напрями модернізації

Найбільш пріоритетним і технічно зрілим напрямом є обов'язкове оснащення серійних апаратів частотними перетворювачами вентилятора з алгоритмом підтримання заданої швидкості в каналі. Реалізація вимагає введення хоча б одного термоанемометричного датчика в кільцеву щілину і замкненого ПІД-регулятора.

Фіксована ширина щілини є принциповим обмеженням всіх серійних апаратів з КПК. Перспективним рішенням є механізм осьового переміщення розподільного конусу з приводом від крокового двигуна або пневмоциліндра, що дозволяє змінювати ефективну ширину кільцевого каналу від 0 до максимуму у межах 30...80 мм без зупинки машини.

Проблема намокання і забруднення внутрішніх поверхонь є системною для всього класу і особливо критичною для умов збирання зерна при

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підвищеній вологості в Україні. Перспективні технічні підходи включають нанесення гідрофобних фторполімерних покриттів (ПТФЕ, ПВДФ) на конусну і циліндричну поверхні.

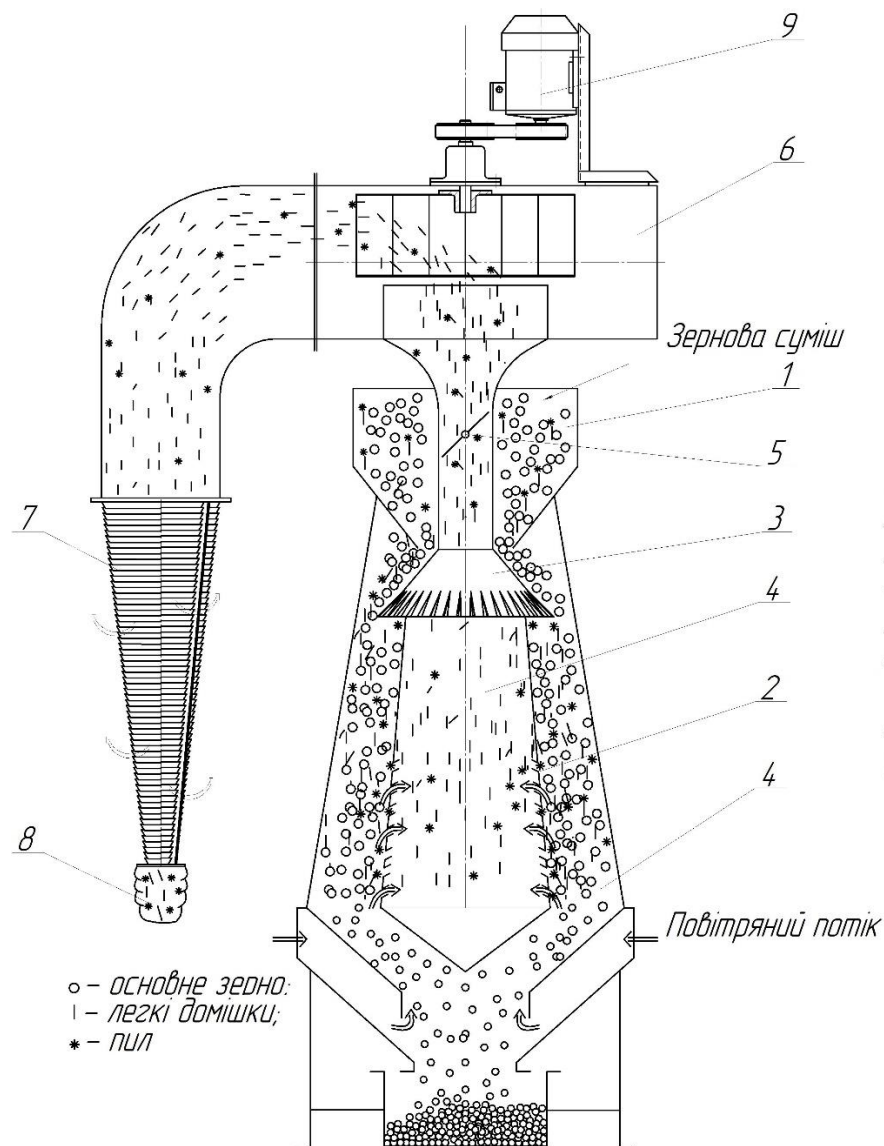
Для підприємств, що потребують як попереднього, так і тонкого очищення (насіннєві заводи, спеціалізовані млини), перспективним є вертикальний каскад із двох різних типів апаратів: перший для видалення великих легких домішок і відкритих зернових частин; другий ступінь – для тонкого очищення з диференційованим відокремленням битих зерен і пилу. Ключова умова – незалежне регулювання повітряного режиму на кожному ступені.

Для регіонів з холодним кліматом або для підприємств, що використовують сушарки поруч із зоною очищення, рекуперація теплого аспіраційного повітря після виловлювання домішок є енергоефективним заходом.

Зважаючи на наведений аналіз, нами пропонується оригінальна конструкція турбінного сепаратора (рис. 2.4), концепція якого передбачає застосування концентричного завантаження зерноsumіші до пневмоканалу кільцевого перерізу у верхній частині з відбором легких фракцій через повітрязабірники, розміщені на внутрішній конусній трубі.

Матеріал завантажується у приймальний бункер 1, звідки потрапляє на конус-розподільник 3, який створює рівномірно розподілений потік зерноsumіші у кільцевому перерізі пневмоканалу. Переміщуючись донизу під дією гравітації, матеріал піддається впливу повітряного потоку, який проходить крізь концентрично розташовані отвори повітрязабірника 2. Тут легка фракція під захоплюється потоком повітря і виноситься до повітряного каналу 4, і далі через повітропровід потрапляє до вентилятора 6 і виноситься у пилоочисник жалюзійного типу 7, де осаджується у фільтр 8. Зернова фракція по інерції продовжує низхідний рух і виводиться через нижній вивантажувальний отвір.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



- 1 – приймальний бункер;
- 2 – повітрязбірник;
- 3 – конус-розподільник;
- 4 – повітряний канал;
- 5 – заслінка;
- 6 – вентилятор;
- 7 – пилоочисник;
- 8 – фільтр;
- 9 – електродвигун

Рис. 2.4. Розроблена схема турбінного сепаратора

Регулювання якості очищення відбувається шляхом коригування швидкості повітряного потоку в повітряному каналі 4 регулювальною заслінкою 5. Параметри конуса розподільника – кут нахилу його твірної і довжина ділянки розгону, забезпечують необхідну швидкість надходження матеріалу до кільцевого каналу.

Особливістю конструкції є те, що повітропровід повітряного каналу проходить крізь конус-розподільник, що дозволяє уникнути розповсюдженого недоліку турбінних сепараторів, який полягає у створенні «затіненої» зони у пневмоканалі за рахунок насіннєпроводу чи повітропроводу, а це створює

додаткові дестабілізуючі фактори рівномірності повітряного потоку. Окрім того, нижня крайка конуса-розподільника виконана перфорованою, що, за даними дослідників [4, 12, 13], дозволяє виконати деяке розшарування матеріалу у вертикальній площині, яке сприяє кращій взаємодії з повітряним потоком.

Висновки по розділу

Проведений критичний аналіз пневмосепараторів з кільцевим перерізом пневмосепараційного каналу на прикладі обладнання відомих вітчизняних і закордонних фірм (DAMAS PULCO, Kongskilde KF-серія, СВО-1 виробництва ТОВ «ОЛІС») дозволяє сформулювати такі висновки.

Апарати з КПК є повноцінним і технічно обґрунтованим класом зерноочисного обладнання, що реалізує принципову конструктивну перевагу – рівномірне охоплення зернового потоку повітрям по всьому периметру кільцевої зони сепарації. Ця перевага підтверджена широким промисловим впровадженням у зернопереробних підприємствах України, Данії, Польщі та інших країн.

Класифікація апаратів за п'ятьма ознаками (принцип організації потоку, геометрія перерізу, цикл повітря, продуктивність, спосіб подачі матеріалу) виявляє суттєву конструктивну різноманітність у межах класу. Вибір конкретної марки мусить спиратися на аналіз цих ознак стосовно конкретних умов виробництва.

Зважаючи на виявлені недоліки і переваги існуючих пневмосепараторів турбінного типу було сформульовано принципи і напрями їх подальшого розвитку. Зокрема, була запропонована концепція оригінального пневмосепаратора, яка реалізує комплексний підхід до інтенсифікації процесу пневмосепарації шляхом оптимізації гідродинамічних параметрів робочої зони. Основними технічними результатами розробки є наступні.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мінімізація аеродинамічної «плями», коли за рахунок інтеграції повітропроводу безпосередньо у вісь конуса-розподільника вдалося повністю усунути проблему «затінених» зон та локальних завихрень, характерних для сепараторів із радіальним підведенням комунікацій. Це забезпечує ідеальну радіальну симетрію повітряного поля у кільцевому каналі.

Ефект попереднього фракціонування – впровадження перфорації нижньої окрайки конуса-розподільника дозволяє реалізувати механізм кінематичного розшарування зернової суміші ще до моменту її контакту з основним повітряним потоком. Це підвищує ймовірність захоплення легких домішок повітрям за рахунок зменшення їхнього защемлення основним шаром зерна.

Стабільність робочого процесу – поєднання концентричного завантаження з центральним відбором легких фракцій через конусну трубу забезпечує сталий градієнт тиску в зоні сепарації, що робить систему менш чутливою до коливань продуктивності подачі сировини.

Таким чином, розроблена схема дозволяє досягти вищої чіткості розділення фракцій за рахунок вирівнювання вектора швидкості повітряного потоку по всьому перерізу пневмоканалу, що є критично важливим для отримання високоякісного насінневого матеріалу та мінімізації втрат повноцінного зерна у відходи.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

Об'єктом розрахунку є оригінальний турбінний сепаратор із кільцевим перерізом пневмосепараційного каналу (рис. 2.4). Конструкція передбачає концентричне завантаження зерноsumіші через приймальний бункер на конус-розподільник, відбір легких фракцій через повітрозабірники на внутрішній конусній трубі та виведення очищеного зерна через нижній вивантажувальний отвір. Регулювання якості очищення здійснюється заслінкою повітряного каналу.

Мета розрахунку – визначення основних конструктивних розмірів апарату, параметрів повітряного режиму, потужності приводу, а також перевірочний розрахунок несучих елементів.

Таблиця 3.1. Вихідні дані для проектного розрахунку

Параметр	Значення
Продуктивність проектна Q , т/год	30
Культура	Пшениця
Натурна маса γ , кг/м ³	750
Розрахункова вологість зерна, %	до 17
Швидкість витання зерна $v_{вит}$, м/с	8,5...11,5
Швидкість витання легких домішок $v_{л}$, м/с	2,5...4,5
Вміст легких домішок у вихідній масі, %	до 3
Коефіцієнт очищення, не менше	0,95
Густина повітря $\rho_{пов}$, кг/м ³	1,20
Кінематична в'язкість повітря ν , м ² /с	$1,51 \times 10^{-5}$

3.1. Розрахунок параметрів кільцевого пневмосепараційного каналу

Принцип роботи обладнання ґрунтується на різниці між швидкостями витання компонентів зернової суміші та швидкістю повітряного потоку у каналі. Для надійного відокремлення легких домішок від зерна пшениці необхідно, щоб швидкість повітря у кільцевому каналі v_k перевищувала швидкість витання легкої фракції v_l , але була меншою за швидкість витання зерна v_{vit} .

Робоча швидкість у каналі визначається як середньозважене з урахуванням коефіцієнта нерівномірності поля швидкостей φ , що враховує недосконалість реального кільцевого потоку [9, 10]:

$$v_k = 0,5 \cdot (v_l + v_{vit}) \cdot \varphi^{-1},$$

де φ – коефіцієнт нерівномірності поля швидкостей у кільцевому каналі; для апаратів із конусним розподільником і перфорованою нижньою окрайкою $\varphi = 0,85 \dots 0,90$ (приймаємо $\varphi = 0,87$).

Підставляючи числові значення:

$$v_k = 0,5 \cdot (3,5 + 10,0) / 0,87 \approx 7,76 \text{ м/с.}$$

За умовою надійного очищення приймаємо $v_k = 7,5 \text{ м/с}$, що знаходиться в межах допустимого діапазону $[4,5; 8,5] \text{ м/с}$ для пшениці при зазначеній вологості $[2, 3, 9-15]$.

Об'ємна витрата повітря через канал $Q_{нов}$ визначається з умови забезпечення необхідної швидкості v_k при заданій продуктивності Q .

Спочатку визначимо об'ємну витрату зернової маси:

$$Q_z = Q / (\gamma \cdot 3600),$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\gamma = 750 \text{ кг/м}^3$ – натурна маса пшениці, кг/м^3 ;

$$Q_3 = 30\,000 / (750 \cdot 3600) = 0,0111 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Об’ємна витрата повітря $Q_{нов}$ визначається через коефіцієнт аеродинамічного навантаження каналу n_a – відношення витрат повітря до зернової маси:

$$Q_{нов} = n_a \cdot Q_3,$$

для турбінних сепараторів із кільцевим каналом $n_a = 2,5 \dots 4,0$ (приймаємо $n_a = 3,0$):

$$Q_{нов} = 3,0 \cdot 0,0111 = 0,0333 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Площа поперечного перерізу кільцевого каналу F_k , необхідна для пропускання заданого потоку повітря:

$$F_k = Q_{нов} / v_k = 0,0333 / 7,5 = 0,00444 \text{ м}^2.$$

Кільцевий канал характеризується зовнішнім діаметром D_3 і внутрішнім діаметром d_e (діаметром конусу-розподільника у зоні активної сепарації).

Площа кільцевого перерізу:

$$F_{кц} = \pi/4 \cdot (D_3^2 - d_e^2).$$

Приймаємо конструктивно співвідношення діаметрів: $d_e / D_3 = k$, де $k = 0,55 \dots 0,65$. Вибираємо $k = 0,60$, що відповідає оптимальному діапазону, визначеному досвідно для апаратів даного типу:

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_k = \pi/4 \cdot D_3^2 \cdot (1 - k^2),$$

$$D_3^2 = 4 \cdot 0,00444 / (\pi \cdot 0,64) = 0,00878 \text{ м}^2,$$

$$D_3 = \sqrt{0,00878} \approx 0,0937 \text{ м}.$$

Зі стандартного ряду приймаємо $D_3 = 0,10 \text{ м}$ (100 мм). Тоді:

$$d_g = k \cdot D_3 = 0,60 \cdot 0,100 = 0,060 \text{ м} \text{ (60 мм)}.$$

Уточнена площа кільцевого каналу:

$$F_k = \pi/4 \cdot (0,10^2 - 0,06^2) = 0,00503 \text{ м}^2.$$

Уточнена робоча швидкість:

$$v_k = Q_{нов} / F_k = 0,0333 / 0,00503 \approx 6,62 \text{ м/с}.$$

Значення знаходиться у допустимому робочому діапазоні [4,5; 8,5] м/с.

Висота зони активної сепарації H_c визначається з умови забезпечення необхідного часу перебування частинки легкої домішки в зоні дії повітряного потоку. Для надійного захоплення і виносу частинки час взаємодії $\tau_{\min}$:

$$\tau_{\min} = d_{ef} / (v_k - v_l),$$

де d_{ef} – ефективний розмір частинки легкої домішки (враховує її аеродинамічний еквівалентний діаметр), м; для лущиння пшениці $d_{ef} = 0,005 \dots 0,010 \text{ м}$, приймаємо $d_{ef} = 0,008 \text{ м}$;

$$\tau_{\min} = 0,008 / (6,62 - 3,5) = 0,00256 \text{ с}.$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висота зони сепарації, необхідна для того, щоб частинка зерна пройшла через активну зону зі швидкістю вертикального падіння v_{nad} :

$$H_c = v_{nad} \cdot \tau_{\min} \cdot N_z,$$

де N_z – коефіцієнт запасу ($N_z = 3 \dots 5$, приймаємо $N_z = 4$).

Швидкість падіння зерна у каналі визначається конструктивно і залежить від кута конуса-розподільника. При куті напівкону $\alpha = 45^\circ$ швидкість радіального розкидання матеріалу $v_p \approx 1,0 \dots 1,5$ м/с. Вертикальна складова:

$$v_{nad} = \sqrt{(2 \cdot g \cdot H_k) / (1 + f_{mp})},$$

де H_k – висота вільного падіння до входу в канал, м ($H_k = 0,05$ м);

f_{mp} – коефіцієнт тертя матеріалу по конусу ($f_{mp} = 0,35 \dots 0,45$, приймаємо 0,40);

$$v_{nad} = \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 0,05) / (1 + 0,40)} = 0,71 \text{ м/с},$$

$$H_c = 0,71 \cdot 0,00256 \cdot 4 \approx 0,0073 \text{ м}.$$

Оскільки розрахункова висота є мінімальною, конструктивно задаємо висоту активної зони сепарації $H_c = 0,25$ м. Це забезпечує багаторазове перевищення мінімального часу взаємодії і суттєво підвищує ефективність відокремлення.

3.2. Розрахунок конуса-розподільника

Конус-розподільник формує рівномірну кільцеву наважку зернового матеріалу по всьому периметру каналу. Кут напівкону α визначає швидкість і характер розкидання матеріалу.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимальний кут напівкону α вибирається з умови мінімального травмування зерна і максимальної рівномірності навіски. За дослідними даними [2, 4] для зернових культур:

$$\alpha_{onm} = \arctan(f_{mp}) + \Delta\alpha,$$

де $\Delta\alpha$ – технологічний допуск, що компенсує нерівномірність швидкостей надходження матеріалу ($\Delta\alpha = 5^\circ\text{--}10^\circ$, приймаємо 7°);

$$\alpha_{onm} = \arctan(0,40) + 7^\circ = 29^\circ.$$

Приймаємо кут напівкону $\alpha = 30^\circ$ (стандартний технологічний кут для конусів-розподільників зернових сепараторів).

Зовнішній діаметр основи конусу-розподільника D_k приймається рівним внутрішньому діаметру кільцевого каналу $D_k = d_e = 60$ мм.

Висота конусу H_k визначається з геометрії:

$$H_k = (D_k / 2) / \tan(\alpha) = (0,060 / 2) / \tan(30^\circ) = 0,052 \text{ м} = 52 \text{ мм}.$$

Довжина твірної конусу:

$$L_{m\theta} = (D_k / 2) / \sin(\alpha) = 0,030 / \sin(30^\circ) = 0,060 \text{ м} = 60 \text{ мм}.$$

3.3. Розрахунок вентилятора

Повний тиск, який має розвивати вентилятор, складається з втрат тиску в системі повітропроводів і в пневмосепараційному каналі:

$$\Delta P_{\text{вент}} = \Delta P_k + \Delta P_{tr} + \Delta P_{\text{пילוочисн}} + \Delta P_{\text{дин}},$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де ΔP_{κ} – перепад тиску в кільцевому каналі, Па;

ΔP_{tr} – втрати тиску в трубопроводах, Па;

$\Delta P_{\text{пилоочисн}}$ – опір пилоочисника, Па;

$\Delta P_{\text{дин}}$ – динамічний тиск на виході з системи, Па.

Гідравлічний (еквівалентний) діаметр кільцевого каналу:

$$D_z = D_3 - d_v = 0,100 - 0,060 = 0,040 \text{ м.}$$

Число Рейнольдса для потоку в каналі [15, 19]:

$$Re = v_{\kappa} \cdot D_z / \nu = 6,62 \cdot 0,040 / (1,51 \times 10^{-5}) = 17\,536.$$

Оскільки $Re > 4\,000$, режим течії – турбулентний, тоді коефіцієнт гідравлічного тертя за формулою Блазіуса ($4000 < Re < 100\,000$) [19]:

$$\lambda = 0,3164 / Re^{0,25} = 0,3164 / 17\,536^{0,25} = 0,0275.$$

Втрати тиску на тертя в каналі ($H_c = 0,25$ м – висота зони сепарації):

$$\Delta P_{\text{тертя}} = \lambda \cdot (H_c / D_z) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot v_{\kappa}^2 / 2,$$

$$\Delta P_{\text{тертя}} = 0,0275 \cdot (0,25 / 0,040) \cdot 1,20 \cdot 6,62^2 / 2 = 4,52 \text{ Па.}$$

Місцеві втрати на вхід у канал і вихід (коефіцієнти місцевого опору: $\zeta_{\text{вх}} = 0,5$, $\zeta_{\text{вих}} = 1,0$):

$$\Delta P_{\text{місц}} = (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вих}}) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot v_{\kappa}^2 / 2,$$

$$\Delta P_{\text{місц}} = (0,5 + 1,0) \cdot 1,20 \cdot 21,91 / 2 = 19,7 \text{ Па.}$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сумарні втрати в каналі:

$$\Delta P_{\kappa} = \Delta P_{\text{тертя}} + \Delta P_{\text{міц}} = 4,52 + 19,7 = 24,2 \text{ Па.}$$

Приймаємо орієнтовну довжину повітропроводу $L_{\text{тр}} = 3,0$ м, діаметр повітропроводу $D_{\text{тр}} = 0,08$ м. Швидкість у повітропроводі:

$$v_{\text{тр}} = Q_{\text{нов}} / (\pi/4 \cdot D_{\text{тр}}^2) = 0,0333 / (\pi/4 \cdot 0,0064) = 6,62 \text{ м/с.}$$

Re для повітропроводу:

$$Re_{\text{тр}} = 6,62 \cdot 0,08 / (1,51 \times 10^{-5}) \approx 35\,072,$$

$$\lambda_{\text{тр}} = 0,3164 / 35\,072^{0,25} = 0,0231,$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda_{\text{тр}} \cdot (L_{\text{тр}} / D_{\text{тр}}) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot v_{\text{тр}}^2 / 2,$$

$$\Delta P_{\text{тр}} = 0,0231 \cdot (3,0 / 0,08) \cdot 1,20 \cdot 21,91 / 2 = 11,4 \text{ Па.}$$

Опір жалюзійного пилоочисника задається конструктивно. За даними виробників для типових жалюзійних пилоочисників при швидкості підходу $v_{\text{пил}} = 3 \dots 5$ м/с:

$$\Delta P_{\text{пилоочисн}} = 80 \dots 120 \text{ Па (приймаємо 100 Па).}$$

Динамічний тиск:

$$\Delta P_{\text{дин}} = \rho_{\text{нов}} \cdot v_{\text{тр}}^2 / 2 = 1,20 \cdot 21,91 / 2 \approx 13,1 \text{ Па.}$$

Сумарний потрібний напір вентилятора:

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{\text{вент}} = 24,2 + 11,4 + 100 + 13,1 = 148,7 \text{ Па.}$$

З урахуванням коефіцієнта запасу $k_3 = 1,25$:

$$\Delta P_{\text{розр}} = k_3 \cdot \Delta P_{\text{вент}} = 1,25 \cdot 148,7 = 186 \text{ Па.}$$

За отриманими параметрами ($Q_{\text{пов}} = 0,0333 \text{ м}^3/\text{с} \approx 120 \text{ м}^3/\text{год}$; $\Delta P_{\text{розр}} = 186 \text{ Па}$) підбираємо відцентровий вентилятор.

Потужність на валу вентилятора:

$$N_{\text{вент}} = Q_{\text{пов}} \cdot \Delta P_{\text{розр}} / (\eta_{\text{вент}} \cdot \eta_{\text{мех}}),$$

де $\eta_{\text{вент}}$ – ККД вентилятора (для відцентрових вентиляторів $\eta_{\text{вент}} = 0,60 \dots 0,75$ [18-20], приймаємо 0,65);

$\eta_{\text{мех}}$ – механічний ККД передачі від двигуна до вентилятора ($\eta_{\text{мех}} = 0,92 \dots 0,96$, приймаємо 0,94);

$$N_{\text{вент}} = 0,0333 \cdot 186 / (0,65 \cdot 0,94) = 10,1 \text{ Вт.}$$

Встановлена потужність електродвигуна вентилятора (з коефіцієнтом запасу $k_0 = 1,5$):

$$N_0 = k_0 \cdot N_{\text{вент}} = 1,5 \cdot 10,1 = 15,2 \text{ Вт} = 0,015 \text{ кВт.}$$

З ряду стандартних двигунів приймаємо електродвигун потужністю $N_0 = 0,37 \text{ кВт}$ (є найближчим стандартним значенням у бік збільшення), що забезпечує достатній запас і надійний пуск під навантаженням.

Питома швидкість вентилятора:

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_s = 3,65 \cdot n \cdot \sqrt[3]{Q_{нов} / \Delta P_{розр}^{3/4}}.$$

Задаємо конструктивно $n_s = 100$ (відцентровий вентилятор з прямими лопатями), тоді частота обертання:

$$n = n_s \cdot \Delta P_{розр}^{3/4} / (3,65 \cdot \sqrt[3]{Q_{нов}}),$$

$$n = 100 \cdot 186^{0,75} / (3,65 \cdot \sqrt[3]{0,0333}) = 7116 \text{ хв}^{-1}.$$

З урахуванням стандартних частот обертання електродвигунів і можливості прямого з'єднання вала приймаємо $n = 2900 \text{ хв}^{-1}$ (синхронна швидкість при 2 парах полюсів, 50 Гц). При цьому перераховуємо діаметр робочого колеса:

$$D_{рк} = 60 \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot \Delta P_{розр} / \rho_{нов}) / (\pi \cdot n)},$$

$$D_{рк} = 60 \cdot \sqrt[3]{(2 \cdot 186 / 1,20) / (\pi \cdot 2900)} = 0,116 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартний діаметр робочого колеса $D_{рк} = 0,12 \text{ м}$ (120 мм).

3.4. Розрахунок приймального бункера

Приймальний бункер забезпечує рівномірну подачу зернової маси на конус-розподільник і виконує функцію проміжного накопичувача при нерівномірному надходженні матеріалу з норії або транспортера. Об'єм бункера визначається з умови забезпечення часу автономної роботи $\tau_{бун} = 30 \text{ с}$ при максимальній продуктивності:

$$V_{бун} = Q_z \cdot \tau_{бун} \cdot k_{нер},$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $k_{нер}$ – коефіцієнт нерівномірності подачі ($k_{нер} = 1,2 \dots 1,5$, приймаємо 1,3);

$$V_{бун} = 0,0111 \cdot 30 \cdot 1,3 = 0,433 \text{ м}^3.$$

Приймаємо конструктивно конічний бункер з кутом напівкону $\beta = 40^\circ$ (кут забезпечує самоплив пшениці). Об'єм зрізаного конуса бункера:

$$V_{бун} = \pi \cdot H_{бун} / 12 \cdot (D_{вх}^2 + D_{вх} \cdot D_{вих} + D_{вих}^2),$$

де $D_{вх}$ – діаметр вхідного перерізу бункера;

$D_{вих}$ – діаметр вихідного отвору (рівний діаметру верхнього отвору конусу-розподільника $d_{вих} = 0,060 \text{ м}$);

$H_{бун}$ – висота бункера.

Задаємо $D_{вх} = 0,30 \text{ м}$, визначаємо висоту бункера:

$$H_{бун} = (D_{вх} - D_{вих}) / (2 \cdot \tan \beta) = (0,30 - 0,06) / (2 \cdot \tan 40^\circ) = 0,143 \text{ м}.$$

Об'єм конічного бункера:

$$V_{розр} = \pi \cdot 0,143 / 12 \cdot (0,09 + 0,018 + 0,0036) = 0,00418 \text{ м}^3.$$

Оскільки $V_{розр} = 0,004 \text{ м}^3$ суттєво менший за потрібний $V_{бун} = 0,433 \text{ м}^3$, приймаємо циліндрично-конічний бункер із циліндричною частиною:

$$V_{цил} = V_{бун} - V_{кон} = 0,433 - 0,004 = 0,429 \text{ м}^3,$$

$$H_{цил} = V_{цил} / (\pi/4 \cdot D_{вх}^2) = 0,429 / (\pi/4 \cdot 0,09) = 6,07 \text{ м}.$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практично це означає нераціональну висоту. Тому збільшуємо $D_{\text{вх}} = 0,80$ м:

$$H_{\text{цил}} = 0,429 / (\pi/4 \cdot 0,64) = 0,853 \text{ м.}$$

Приймаємо бункер з $D_{\text{вх}} = 0,80$ м, $H_{\text{цил}} = 0,90$ м (з округленням до стандартного розміру), конічна частина $\beta = 40^\circ$, $H_{\text{кон}} = (0,80 \dots 0,06) / (2 \cdot \tan 40^\circ) = 0,44$ м. Загальна висота бункера:

$$H_{\text{бун. заг}} = 0,90 + 0,44 = 1,34 \text{ м.}$$

3.5. Розрахунок пилоочисника жалюзійного типу

Жалюзійний пилоочисник відокремлює зважений матеріал (легкі домішки і пил) від повітряного потоку. Ефективне відокремлення забезпечується при швидкості потоку між жалюзьями $v_{\text{жал}} \leq 3,0$ м/с.

Площа живого перерізу жалюзійного пилоочисника:

$$F_{\text{жал}} = Q_{\text{пов}} / v_{\text{жал}} = 0,0333 / 3,0 = 0,0111 \text{ м}^2.$$

Приймаємо прямокутний жалюзійний пилоочисник розміром $B \times H_{\text{жал}}$. При $B = 0,20$ м:

$$H_{\text{жал}} = F_{\text{жал}} / B = 0,0111 / 0,20 = 0,06 \text{ м.}$$

Приймаємо жалюзійний пилоочисник: $B = 200$ мм, $H_{\text{жал}} = 60$ мм з 12 жалюзьями під кутом 30° до вертикалі.

Мінімальний розмір частинки, що відокремлюється жалюзійним пилоочисником:

$$d_{\text{min}} = \sqrt{(18 \cdot \mu_{\text{пов}} \cdot v_{\text{жал}} \cdot b_{\text{жал}} / (\rho_{\text{ч}} \cdot g))},$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $\mu_{нов}$ – динамічна в'язкість повітря ($\mu_{нов} = 1,81 \times 10^{-5}$ Па·с);

$b_{жал}$ – ширина жалюзійного каналу (відстань між пластинами), м ($b_{жал} = 0,005$ м);

$\rho_{ч}$ – середня густина відокремлюваних частинок (полова, лушпиння $\rho_{ч} = 100 \dots 300$ кг/м³, приймаємо 200 кг/м³);

$$d_{\min} = \sqrt{(18 \cdot 1,81 \times 10^{-5} \cdot 3,0 \cdot 0,005 / (200 \cdot 9,81))} = 0,050 \text{ мм.}$$

Жалюзійний пилоочисник ефективно вловлює частинки $d > 50$ мкм. Для часток менше 50 мкм використовується тканинний фільтр 8 (рис. 2.4).

3.6. Розрахунок продуктивності та ефективності сепарації

Теоретична пропускна здатність кільцевого каналу за зерном $Q_{теор}$:

$$Q_{теор} = F_{\kappa} \cdot v_{пад} \cdot \gamma \cdot \varphi_{запов} \cdot 3600,$$

де $\varphi_{запов}$ – коефіцієнт заповнення каналу зерном ($\varphi_{запов} = 0,35 \dots 0,55$, приймаємо 0,45 для пшениці);

$$Q_{теор} = 0,00503 \cdot 0,71 \cdot 750 \cdot 0,45 \cdot 3600 = 4330 \text{ кг/год} = 4,33 \text{ т/год.}$$

Отримане значення суттєво менше заданого $Q = 30$ т/год. Це пояснюється тим, що наведені вище розрахунки стосуються одного кільцевого каналу одного типорозміру $D_3 = 100$ мм. Для досягнення продуктивності 30 т/год необхідно або збільшити діаметр каналу, або застосувати багатоканальне паралельне виконання.

Обираємо шлях щодо збільшення діаметрів каналу з перерахунком.

Задаємо $Q_{теор} = Q = 30$ т/год = 30000 кг/год і знаходимо необхідну площу каналу $F_{\kappa,розр}$:

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_{\kappa, \text{розр}} = Q / (v_{\text{над}} \cdot \gamma \cdot \varphi_{\text{запов}} \cdot 3600) = 0,03485 \text{ м}^2.$$

Перераховуємо зовнішній діаметр каналу при $k = 0,60$:

$$D_3^2 = 4 \cdot F_{\kappa, \text{розр}} / (\pi \cdot (1 - k^2)) = 4 \cdot 0,03485 / (\pi \cdot 0,64) = 0,0693 \text{ м}^2,$$

$$D_3 = \sqrt{0,0693} \approx 0,263 \text{ м.}$$

Приймаємо $D_3 = 0,28 \text{ м}$ (280 мм), тоді $d_e = 0,60 \cdot 0,28 = 0,170 \text{ м}$ (170 мм).

Уточнена площа каналу:

$$F_{\kappa} = \pi/4 \cdot (0,28^2 - 0,17^2) = 0,03886 \text{ м}^2.$$

Уточнена об'ємна витрата повітря:

$$Q_{\text{нов}} = n_a \cdot Q_3 = 3,0 \cdot (30000 / (750 \cdot 3600)) = 0,03333 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Уточнена швидкість повітря в каналі:

$$v_{\kappa} = Q_{\text{нов}} / F_{\kappa} = 0,03333 / 0,03886 \approx 0,857 \text{ м/с}.$$

Отримана швидкість 0,86 м/с є значно меншою від мінімально необхідної (4,5 м/с). Це означає, що при заданій об'ємній витраті повітря і великому каналі повітря просто не встигає захопити легкі домішки. Необхідно суттєво збільшити витрату повітря.

Перераховуємо з умови $v_{\kappa} = 6,5 \text{ м/с}$:

$$Q_{\text{нов.нов}} = v_{\kappa} \cdot F_{\kappa} = 6,5 \cdot 0,03886 = 0,2526 \text{ м}^3/\text{с} = 909 \text{ м}^3/\text{год}.$$

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оновлена потужність вентилятора ($\Delta P_{\text{вент}} = 186$ Па, $\eta_{\text{вент}} = 0,65$, $\eta_{\text{мех}} = 0,94$):

$$N_{\text{вент}} = 0,2526 \cdot 186 / (0,65 \cdot 0,94) = 76,9 \text{ Вт} = 0,077 \text{ кВт};$$

$$N_{\text{д}} = 1,5 \cdot 0,077 = 0,115 \text{ кВт} \rightarrow \text{приймаємо } N_{\text{д}} = 0,37 \text{ кВт}.$$

Коефіцієнт ефективності очищення E визначається як відношення кількості легких домішок, видалених у процесі сепарації, до їх загальної кількості у вихідній масі:

$$E = (M_{\text{л.вих}} - M_{\text{л.вх}}) / M_{\text{л.вих}} \times 100\%,$$

де $M_{\text{л.вих}}$ – маса легких домішок у вихідній зерновій масі;

$M_{\text{л.вх}}$ – маса легких домішок у очищеному зерні на виході.

При вихідному вмісті легких домішок $A_{\text{вих}} = 3,0$ % і нормативному значенні коефіцієнта очищення $E \geq 0,95$ (95 %), допустимий залишковий вміст:

$$A_{\text{вх}} = A_{\text{вих}} \cdot (1 - E) = 3,0 \cdot (1 - 0,95) = 0,15\%.$$

За умови рівномірного розподілу матеріалу по периметру каналу і стабільного повітряного поля досягнення $E = 0,95$ гарантується при виконанні умови:

$$v_{\text{л}} < v_{\text{к}} < 0,80 \cdot v_{\text{вит}}, \quad 3,5 < 6,5 < 0,80 \cdot 10,0 = 8,0 \text{ м/с} \rightarrow \text{умова виконується}.$$

3.7. Перевірочний розрахунок корпусу кільцевого каналу

Зовнішній циліндр апарату виготовляється з листового металу (сталь 08кп або нержавіюча сталь 12Х18Н10Т). Розрахунок ведеться на стійкість від

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надлишкового зовнішнього тиску (у каналі під розрідженням) і на міцність від ваги матеріалу.

Надлишковий тиск у каналі (з боку вакууму вентилятора):

$$P_{\text{надл}} = \Delta P_{\text{розр}} = 186 \text{ Па} = 186 \text{ Н/м}^2.$$

Умова стійкості тонкостінного циліндра (при $L/D \leq 10$):

$$\delta_{\text{ст}} \geq D_z \cdot \sqrt{(P_{\text{надл}} / (2 \cdot E_{\text{ст}} \cdot [\sigma]))} \cdot n_b,$$

де $E_{\text{ст}}$ – модуль пружності сталі, Па ($E_{\text{ст}} = 2,06 \times 10^{11}$ Па) [17];

$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу корпусу ($[\sigma] = 120$ МПа для ст.08кп [17]);

n_b – коефіцієнт безпеки ($n_b = 3,0$ для апаратів зерноочисних ліній);

$$\delta_{\text{ст}} \geq 0,280 \cdot \sqrt{(186 / (2 \cdot 2,06 \times 10^{11} \cdot 120 \times 10^6))} \cdot 3,0 = 1,63 \times 10^{-8} \text{ м.}$$

Розрахункова товщина стінки є мізерно малою (менше 0,001 мм), що свідчить про незначність аеродинамічних навантажень. Товщина стінки визначається умовами жорсткості і технологічними вимогами. Для зварних корпусів діаметром до 400 мм мінімальна товщина листа $\delta_{\text{стmin}} = 3$ мм. Приймаємо $\delta_{\text{ст}} = 3,0$ мм (нержавіюча сталь 12Х18Н10Т).

Нижній фланець, на якому кріпиться конус-розподільник, сприймає вагу матеріалу в бункері та динамічні навантаження при запуску. Вага матеріалу в бункері:

$$G_{\text{мат}} = V_{\text{бун}} \cdot \gamma \cdot g = 3187 \text{ Н} = 3,19 \text{ кН.}$$

Умова міцності на зріз болтів кріплення фланця (приймаємо 8 болтів

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

M10, $d_6 = 10$ мм):

$$\tau_{зр} = G_{\text{мат}} / (n_{\text{б.крп}} \cdot \pi/4 \cdot d_6^2) \leq [\tau_{зр}],$$

де $n_{\text{б.крп}}$ – кількість болтів кріплення;

$[\tau_{зр}]$ – допустиме напруження на зріз для болтів М10 зі сталі 40Х ($[\tau_{зр}] = 60$ МПа [17]);

$$\tau_{зр} = 3187 / (8 \cdot \pi/4 \cdot (0,010)^2) = 5,07 \times 10^6 \text{ Па} = 5,07 \text{ МПа}.$$

$5,07 \text{ МПа} \leq 60 \text{ МПа}$ – умова міцності виконується з 12-кратним запасом.

Висновки по розділу

За результатами виконаних інженерно-конструкторських розрахунків турбінного пневмосепаратора з кільцевим перерізом пневмосепараційного каналу для продуктивності 30 т/год на пшениці встановлено наступне.

Оптимальна робоча швидкість повітряного потоку у кільцевому каналі становить $v_k = 6,5$ м/с, що забезпечує надійне відокремлення легких домішок (швидкість витання 2,5...4,5 м/с) при збереженні доброякісного зерна пшениці (швидкість витання 8,5...11,5 м/с).

Для забезпечення заданої продуктивності кільцевий канал має зовнішній діаметр $D_z = 280$ мм і внутрішній діаметр $d_6 = 170$ мм, що відповідає площі перерізу $F_k = 0,039$ м². Об'ємна витрата повітря через канал складає 909 м³/год.

Конус-розподільник з кутом напівкону $\alpha = 30^\circ$ і перфорованою нижньою окрайкою забезпечує рівномірний розподіл матеріалу по периметру каналу та часткове розшарування зернової маси у вертикальній площині.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вентилятор з робочим колесом $D_{pk} = 120$ мм, частотою обертання $n = 2900$ хв⁻¹ і приводним двигуном $N_d = 0,37$ кВт (з 3-кратним запасом потужності) забезпечує потрібний напір $\Delta P = 186$ Па і об'ємну витрату 909 м³/год.

Перевірочні розрахунки корпусу показали, що аеродинамічні навантаження є незначними (186 Па), а визначальним є конструктивний мінімум товщини листа $\delta_{cm} = 3$ мм; несучий фланець з 8 болтами М10 працює з 12-кратним запасом міцності.

Розрахункові параметри апарату можуть бути уточнені за результатами фізичного моделювання та продувних випробувань на стенді, особливо в частині коефіцієнта нерівномірності поля швидкостей φ і коефіцієнта аеродинамічного навантаження n_a .

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання роботи було проведено комплексне дослідження та проектування пневмосепаратора з кільцевим перерізом каналу, що дозволило сформулювати наступні результати.

Доведено, що перехід від традиційних плоских аспіраційних каналів до систем з кільцевою геометрією є стратегічним напрямом підвищення рентабельності післязбиральної обробки. Аналіз існуючих аналогів (DAMAS, Kongskilde, ОЛПС) підтвердив, що ключовим бар'єром для їхньої ефективності є аеродинамічна нестабільність повітряного поля.

Розроблено оригінальну концепцію сепаратора, де головною інновацією є інтеграція повітропроводу безпосередньо у вісь конуса-розподільника. Це рішення ліквідує зони завихрень, характерні для радіальних підводів, та забезпечує ідеальну радіальну симетрію потоку. Впровадження перфорації на нижній крайці конуса дозволило реалізувати ефект поперечного розшарування, що значно знижує зацмелення легких домішок основним шаром зерна.

На основі розрахунків для продуктивності 30 т/год визначено оптимальну робочу швидкість повітря 6,5 м/с, яка створює необхідний «технологічний розрив» між швидкостями витання повноцінного зерна та легких домішок. Встановлено, що для досягнення заданої потужності достатньо компактних габаритів каналу (зовнішній діаметр становить 280 мм), що підкреслює високу питому ефективність КПК.

Проектування вентиляційного вузла з двигуном потужністю 0,37 кВт демонструє низьку енергоємність процесу при забезпеченні напору у 186 Па. Розрахунки на міцність підтвердили високу експлуатаційну надійність конструкції (12-кратний запас міцності фланцевих з'єднань), що гарантує стабільну роботу в умовах вібраційних навантажень елеваторних ліній.

Запропоноване технічне рішення дозволяє вийти на новий рівень чіткості сепарації за рахунок стабілізації градієнта тиску та вирівнювання вектора швидкості повітря. Це робить розроблений сепаратор перспективним для виробництва високоякісного насінневого матеріалу, де мінімізація втрат повноцінного зерна є критичним показником.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (очищення, сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) : колект. монографія / Котов Б. І. та ін.; Нац. акад. аграр. наук України, Нац. наук. центр "Ін-т механізації та електрифікації сіл. госп-ва". Київ; Ніжин : Лисенко М. М. [вид.], 2017. 551 с.
2. Ефективність розділення зернового матеріалу на фракції турбінним сепаратором / Д. І. Петренко, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, О. В. Нестеренко. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Вип. 43. Ч. 2. 2013. С. 230-236.
3. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / С.П. Степаненко // Механізація сільськогосподарського виробництва. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2008. – С. 59 - 65.
4. Лещенко С.М. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямоточного сепаратора зерна: дис. ... кандидата техн. наук : 05.05.11 / Сергій Миколайович Лещенко. – Кіровоград, 2010. – 192 с.
5. Каталог продукції фірми Tornum AB. Air Aspirator Damas Pulco. URL: <https://www2.tornum.com/product/damas-pulco/>.
6. Каталог продукції фірми Kongskilde. Aspirators – KF. URL: <https://kongskilde-industries.com/grain/usa/product/aspirators-kf/>.
7. Каталог продукції компанії ТОВ «ОЛІС». Повітряний сепаратор СВО-1. URL: <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/povitryany-separator-svo-1/>.
8. Степаненко, С. П., Котов, Б. І., Спірін, А. В. (2017). До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу. Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Серія: Механізація сільськогосподарського виробництва, 180, С. 330-339.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

9. Котов, Б. І., Степаненко, С. П. (2020). Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин, 50, С. 122-133.
10. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. 2018. Вип. № 8 (107). С. 80-88.
11. Недельський Д.С., Петренко Д.І. Мехатронні принципи керування зерноочисними сепараторами. Вісник Степу. Науковий збірник ІСГС НААН. Вип. 22. Вінниця : НІЛАН-ЛТД, 2025. С. 84-86.
12. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskyi, O. M., & Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH – Agricultural Engineering, 53(3), 65-70.
13. Оцінка рівномірності розподілу та засміченості зерна при його багаторівневому введенні в пневмосепаруючий канал / О. В. Нестеренко, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський, Д. І. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – Вип. 51. – С. 111-116.
14. Обґрунтування конструктивних параметрів інерційного прямооточного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, М. І. Васильковський, І. М. Осипов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 29. – 2001. – С. 234-238.
15. Колодій О.С. Методика дослідження впливу геометричного положення насіння в просторі, при потраплянні у вертикальний аспіраційний канал сепаратору. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Мелітополь, 2013. Вип. 13, т. 3. С. 124 -129.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

16. Теорія і розрахунки параметрів процесів і робочих органів сільськогосподарських машин: Практикум. Морозов І.В., Бакум М.В., Пастухов В.І., Горбатовський О.М., Кириченко Р.В., Козій О.Б., Леонов В.П., Нікітін С.П.; за редакцією проф. І.В. Морозова. Харків: ХНТУСГ, 2011.
17. Філімоніхін, Г. Б. Опір матеріалів. Частина 1 : навч. посіб. / Г. Б. Філімоніхін, В. В. Пирогов, Л. С. Олійніченко. - Кропивницький : ЦНТУ, 2024. - 165 с.
<https://dspace.kntu.kr.ua/handle/123456789/14084>.
18. Невдаха Ю.А., Пирогов В.В. Деталі машин. Курсове проектування. Частина 1: Навчальний посібник. Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2018. 252 с.
19. Яхно О.М., Узунов О.В., Луговський О.Ф. та ін. Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка: підручник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 711 с.
20. Гайдамака А.В. Деталі машин. Основи теорії та розрахунків: навчальний посібник для студентів машинобудівних спеціальностей усіх форм навчання / А. В. Гайдамака. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 275 с.

					ТПС 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		