

2	БРЕУС Максим Олександрович	ГМО-24-1м	Обґрунтування раціональних параметрів робочого колеса радіального відцентрового вентилятора	Громадський Вік.А. старший викладач канд. тех. наук
---	----------------------------------	-----------	--	--

ВСТУП

Відцентрові вентилятори типу біляча клітка широко застосовуються в різних галузях народного господарства, зокрема в гірничодобувній, металургійній та хімічній промисловості, а також в енергетиці та системах кондиціювання повітря. Вони відіграють ключову роль у забезпеченні вентиляції та переміщенні повітряних потоків у різноманітних промислових застосуваннях.

Однак, незважаючи на широке застосування, відцентрові вентилятори з багатолопатеvim робочим колесом стикаються з технічними проблемами, такими як низький коефіцієнт корисної дії (ККД) та недостатній повний тиск. Вони особливо схильні до відриву потоку навколо лопатей та нерівномірності потоку на вході в робоче колесо, що призводить до зниження їх аеродинамічних характеристик та збільшення споживання енергії. Крім того, аеродинамічний шум є значною проблемою, яка потребує зниження. Втрати робочого колеса тісно пов'язані з виникненням відривного потоку в каналі лопаті: чим сильніший відрив, тим більші втрати робочого колеса.

З огляду на ці виклики, оптимізація конструкції робочого колеса набуває вирішального значення для підвищення продуктивності та ефективності відцентрових вентиляторів.

Завдяки швидкому розвитку комп'ютерних технологій, обчислювальна гідродинаміка (CFD) широко застосовується для аналізу та вдосконалення внутрішнього поля потоку вентилятора, що має життєво важливе значення для його аеродинамічних показників. Методи оптимізації включають в себе використання подвійних або багатодугових лопатей для збільшення профільного навантаження, дослідження оптимальних комбінаційних параметрів розміру конструкції робочого колеса, а також оптимізацію лопатей за допомогою профільного дизайну розподілу швидкості або аеродинамічного профілю. Результати досліджень показують, що вентилятори з високим співвідношенням підйомної сили до опору мають кращу функціональну потужність та аеродинамічні характеристики. Дослідження також продемонстрували можливість

зниження шуму шляхом зміни довжини лопатей, оскільки вентилятори з коротшими лопатями мають нижчий рівень шуму, зберігаючи при цьому відмінні робочі характеристики.

Таким чином, ця наукова робота зосереджена на оптимізації конструкції робочого колеса відцентрового вентилятора типу біляча клітка з метою подолання існуючих технічних проблем та покращення їх загальної продуктивності. Застосування передових методів моделювання та оптимізації дозволяє розробляти інноваційні рішення для підвищення ефективності, тиску та зниження шуму в цих важливих промислових пристроях.

Вентилятори широко використовуються в таких галузях, як гірничовидобувна та переробна галузь, металургія, хімічне машинобудування, нафтопереробка, виробництво природного газу та холодильна. Крім того, вентилятор є одним з найважливіших допоміжних засобів на електростанціях. Енергоспоживання різних вентиляторів становить 1,5%-2,5% одиничної виробленої електроенергії.

Багатолопатеві відцентрові вентилятори широко використовуються в основному для аспіраційних установок збагачувальних фабрик та цехів промислових підприємств, рідше для вентиляційних установок шахт. Вони мають високий коефіцієнт потоку, високий тиск, менші розміри та низький рівень шуму. Однак під дією обертової дії лопатей вентилятора внутрішній потік крильчатки відцентрового вентилятора є складним. Складні характеристики потоку, такі як турбулентність, завихрення, вторинний потік і структура струменя, додатково впливатимуть на стабільність і роботу вентилятора, що призводить до пошкодження вентилятора та збільшення споживання енергії.

Щоб покращити продуктивність вентиляції та зменшити втрати енергії, необхідно підвищити ефективність багатолопатевих відцентрових вентиляторів. Максимальні втрати енергії розподілені поблизу фронту всмоктування.. В даний час існує три методи проектування лопатей: впровадження подвійних або багатодугових лопатей для підвищення профільного навантаження, дослідження параметрів оптимальної комбінації структурного розміру крильчатки та

оптимізація лопатей вентилятора через профільну конструкцію розподілу швидкості.

За результатами відомих досліджень лопаті аеродинамічного профілю можуть покращити аеродинамічні характеристики вентилятора, що підтверджує, що оптимізація форми лопатей є ефективним методом покращення продуктивності вентилятора. Виходячи з цього, вкрай необхідно проводити поглиблені дослідження характеристик внутрішнього потоку вентилятора та постійно оптимізувати конструкцію його лопатей.

Стабільність внутрішнього поля потоку відцентрового вентилятора є життєво важливим для його аеродинамічних характеристик. Зі швидким розвитком комп'ютерних технологій системи моделювання динаміки рідини (CFD) широко застосовується в різних галузях, таких як аерокосмічна, нафтогазова та турбінна промисловість. Багато вчених використовують технологію CFD для аналізу поля потоку відцентрового вентилятора.

Отже дослідження процесу роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка» та визначення раціональних параметрів лопатей є **актуальним науково-технічним завданням.**

Метою роботи є покращення режиму роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка» за рахунок обґрунтування раціональних параметрів лопатей робочого колеса.

Об'єкт досліджень – процес роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка».

Предмет дослідження – параметри лопатей робочого колеса типу «біляча клітка» відцентрового вентилятора.

Наукове положення.

1. Вперше встановлено, що застосування лопатей з аеродинамічним профілем НАСА 2412 на робочих колесах відцентрових вентиляторів типу «біляче колесо» забезпечує оптимальне поєднання енергетичної ефективності, стабільності потоку та максимальної продуктивності, що підтверджує

доцільність застосування профільованих лопаток замість традиційних напівкруглих;

2. Вперше встановлено, що застосування втулки конічної форми у центральній частині робочого колеса відцентрових вентиляторів типу «біляче колесо» впливає на структуру повітряного потоку та продуктивність вентилятора і підвищує продуктивність на 5 %;
3. Обґрунтовано вибір технології серійного виготовлення профільованих аеродинамічних лопатей залежно від обсягу виробництва: для малих серій доцільними є CNC-обробка та 3D-друк; для середніх серій — композити або інвестиційне лиття; для великих серій — штампування та лиття під тиском, що забезпечують мінімальну собівартість.

1. АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ПРОСІВАННЯ НА ІНЕРЦІЙНИХ ГРОХОТАХ

1.1. Аналіз класифікацій відцентрових вентиляторів

Відцентрові вентилятори широко застосовують у різних галузях народного господарства. Вони є невід'ємною частиною багатьох технологічних установок, включаючи гірничодобувну, металургійну та хімічну промисловість, а також енергетику та системи кондиціонування повітря. Зокрема, від їх ефективної роботи багато в чому залежить успішне перебіг виробничих процесів та зростання випуску продукції.

У гірничодобувній та гірничозбагачувальній галузях відцентрові вентилятори, у тому числі типу «білизна клітина», відіграють ключову роль у забезпеченні вентиляції робочих просторів, переміщенні повітряних потоків, а також відведенні гарячих виробок та підтримці нормальних атмосферних умов.

Прикладом специфічного застосування є шахтні та рудничні вентилятори, призначені для роботи у важких умовах.

Відцентровий вентилятор зазвичай включає в себе робоче колесо (крильчатку), кожух і привід. Робоче колесо, своєю чергою, складається з безлічі лопатей. Тип лопатей грає критичну роль аеродинамічних характеристиках вентилятора.

Незважаючи на їх широке застосування, багатолопатеві відцентрові вентилятори, включаючи тип «білизна клітина», стикаються з технічними проблемами, такими як низький коефіцієнт корисної дії (ККД) та недостатній повний натиск. Ці проблеми часто пов'язані з відривом потоку в каналі лопаті та нерівномірністю потоку на вході в робоче колесо, що призводить до зниження аеродинамічних характеристик та збільшення енергоспоживання. Крім того, аеродинамічний шум є значною проблемою, яка потребує зменшення. Втрати робочого колеса тісно пов'язані з виникненням відривного потоку: що сильніший відрив, то більше втрат. Дослідження показують, що вентилятори з короткими лопатями можуть мати нижчий рівень шуму, зберігаючи при цьому відмінні експлуатаційні характеристики. Також, у робочому колесі може виникати

сильний вихор, що призводить до зниження повного тиску та відділення потоку від лопатей.

Таким чином, оптимізація конструкції робочого колеса є критично важливим завданням для підвищення продуктивності та ефективності відцентрових вентиляторів.

Сучасні методи, такі як обчислювальна гідродинаміка (CFD), активно використовуються для аналізу та покращення внутрішнього поля потоку вентилятора. Різні підходи до оптимізації включають використання профільних лопат з високим ставленням підйомної сили до опору, а також зміна геометричних параметрів, таких як довжина лопатей і кути установки лопатей.

Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник — М.: Машиностроение, 1980. — 176 с.

На сьогоднішній день єдиної загальноприйнятої класифікації відцентрових вентиляторів не має. Однак вентилятори можуть бути класифіковані за окремими ознаками: швидкохідності, створюваного тиску, схеми компонування, типу приводу, призначенню і т. д.

За швидкохідністю вентилятори можуть бути поділені на:

- малої швидкохідності ($n_y = 11-30$). Мають малі діаметри входу, невелику ширину колеса, малу ширину та розкриття спірального корпусу. Лопатки робочого колеса можуть бути загнуті у напрямку його обертання та проти цього напрямку. Чим нижча швидкохідність вентилятора, тим менша форма лопатки впливає на його аеродинамічну характеристику. Максимальний ККД цих вентиляторів не перевищує 0,8. Габаритність змінюється в діапазоні $D_y = 6 - 1,7$.

- середньої швидкохідності ($n_y = 30 - 60$). Значно відрізняються своїми геометричними та аеродинамічними параметрами. Середню швидкохідність мають вентилятори з колесом барабанного типу і великим діаметром входу, у яких коефіцієнти тиску близькі до максимально можливих ($\psi = 1$). У цих вентиляторів досягнуто максимального ККД 0,73. Таку ж швидкохідність мають

вентилятори із загнутими назад лопатками та невеликими коефіцієнтами тиску. Максимальний ККД цих вентиляторів може досягати 0,87. Габаритність вентиляторів середньої швидкохідності з великими та малими коефіцієнтами ψ відрізняється майже у 2 рази.

- великої швидкохідності ($n_y = 60 - 81$). Мають широкі робочі колеса з невеликою кількістю лопаток, загнутих проти напрямку обертання робочого колеса- Коефіцієнти тиску $\psi < 0,9$. Ці вентилятори можуть мати близькі до максимально можливе значення ККД 0,9.

До класу вентиляторів належать повітродувні машини, що забезпечують повний тиск до 3000 кгс/см^2 . Вентилятори загального призначення за величиною повного тиску, створюваного при номінальному режимі, поділяють на вентилятори:

- низького тиску. Створюють повний тиск до 100 кгс/м^2 . До них відносяться вентилятори середньої та великої швидкохідності, у яких робочі колеса мають широкі листові лопатки. Максимальна окружна швидкість таких коліс вбирається у 50 м/с . Вентилятори низького тиску широко використовують у вентиляційних санітарно-технічних системах.

- середнього тиску. Створюють повний тиск у діапазоні від 100 до 300 кгс/м^2 . Ці вентилятори мають лопатки, загнуті як за напрямом обертання колеса, так і проти цього напрямку. Максимальна окружна швидкість сягає 80 м/с . Вентилятори застосовують у вентиляційних та технологічних установках різного призначення.

- високого тиску. Створюють повний тиск понад 300 кгс/м^2 . Робочі колеса вентиляторів високого тиску зазвичай мають лопатки, загнуті назад, так як вони більш ефективні. Окружна швидкість робочих коліс більше 80 м/с . Тому у разі широких коліс (вентилятори середньої швидкохідності) застосовують профільні лопатки з плоским або трохи похилим переднім диском.

Повний тиск понад 1000 кгс/м^2 може бути забезпечений вентиляторами малої швидкохідності з вузькими робочими колесами, близькими за

геометричними параметрами до компресорних. Їхня окружна швидкість при відповідному конструктивному виконанні може досягати 200 м/с. Такі

Класифікація відцентрових вентиляторів можуть бути класифіковані за компонованням робочих коліс і формою корпусу:

1. Одноступеневі відцентрові вентилятори звичайного виконання, складаються з одного робочого колеса та спірального корпусу, (див. рис. 1.1). Таке компоновання відцентрових вентиляторів найбільше поширене на практиці.

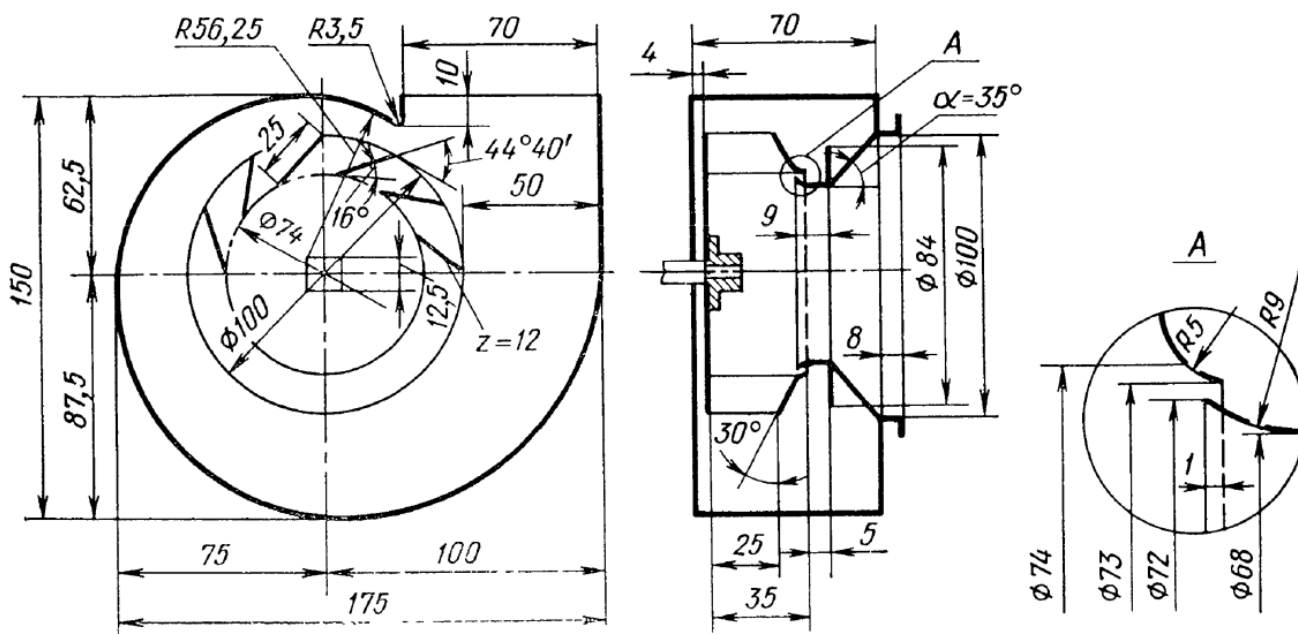


Рис 1.1 – Схема одноступеневого відцентрового вентилятора

Можливі інші виконання одноступеневих вентиляторів. Для зручності компоновання відцентрові вентилятори в ряді випадків повинні мати не одне, а два і більше вихідних отворів спірального корпусу (рис 1.2, сх 2), іноді у вигляді сильно витягнутого прямокутника. У деяких компоновках буває необхідно здійснити вихід повітря по кільцевому каналу. Тоді за робочим колесом встановлюють радіальний дифузор з лопатками або без них (рис 1.2, сх 4,5). Якщо потік повітря повернути в осьовому напрямку, то за дифузором розміщують кільцеву тороїдальну поворотну ділянку або радіально-осьовий спрямовуючий апарат. Відцентровий вентилятор у компонованні з корпусом, що здійснює вихід повітря в осьовому напрямку, називають проточним або зворотньо-

прямоточним залежно від того, чи збігається напрямок вихідного потоку з напрямком входу повітря або протилежно йому. Вентилятори з такими корпусами або дифузорами використовують у різних печах, автоклавах, та ін.

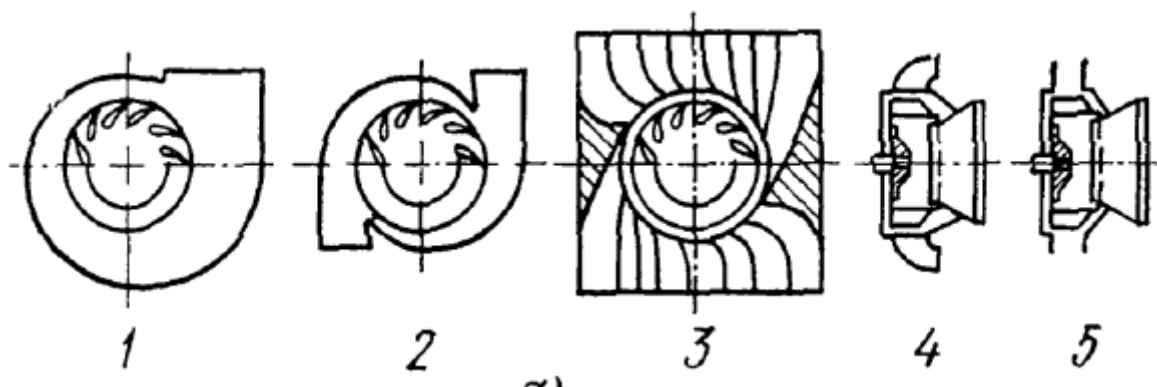


Рис 1.2 – Компонування корпусу одноступеневого відцентрового вентилятора

2. Двосторонній відцентровий вентилятор складається з двох робочих коліс звичайного відцентрового вентилятора, що є дзеркальним відображенням одного іншим, із загальним заднім диском, двох вхідних патрубків та спірального корпусу шириною в 2 рази більшої ширини одноступеневого вентилятора. Такий вентилятор фактично є двома паралельно працюючими односторонніми відцентровими вентиляторами. У зв'язку з цим номінальна продуктивність такого вентилятора та споживана потужність можуть у 2 рази перевищувати відповідні параметри одностороннього вентилятора при тому ж діаметрі та частоті обертання колеса (рис. 1.3).

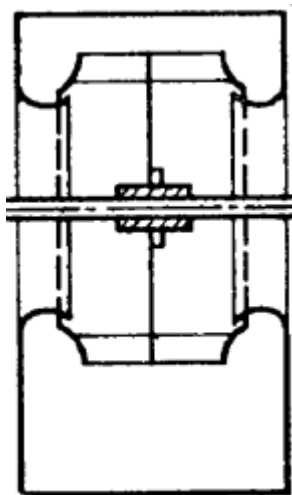


Рис 1.3 - Двосторонній відцентровий вентилятор

Застосування високовитратних двосторонніх вентиляторів дозволяє використовувати більш швидкохідні електродвигуни, зменшити діаметр, і відповідно, габаритні розміри і масу вентиляторної установки. Особливо доцільно використання двосторонніх вентиляторів під час їхньої роботи на нагнітання з вільним входом. При роботі на всмоктування, як це має місце, наприклад, для шахтних вентиляторів головного провітрювання, необхідно застосовувати складну систему трубопроводів, що підводять повітря до вентилятора (вхідні коробки, трійники). Останнє призводить до додаткових втрат та зниження ККД вентиляторної установки на 3-5%.

3. Двоступінчастий відцентровий вентилятор являє собою два послідовно працюючі відцентрові вентилятори, причому у разі компактних установок перехід від першого до другого ступеня здійснено за допомогою радіальних лопаткових спрямовуючих і направляючих апаратів (рис 1.4).

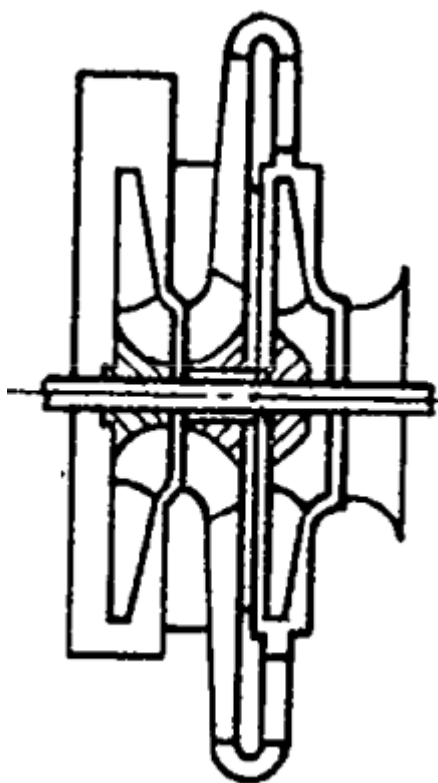


Рис 1.4 - Двоступінчастий відцентровий вентилятор

Коефіцієнти тиску двоступінчастих вентиляторів в 1,8-2 рази вище відповідних коефіцієнтів одноступінчастого вентилятора, що дозволяє при тих же габаритних розмірах та частоті обертання установки забезпечити майже вдвічі вищий тиск. Двоступінчасті відцентрові вентилятори широко використовують для створення високого тиску, якщо габаритні розміри у вентиляторної установки обмежені, наприклад у пиłosосах, фільтроочистних пристроях та ін. Нерухомі радіальні лопаткові та безлопаткові дифузори, встановлені безпосередньо за робочим колесом, не є ефективними у разі загнутих вперед лопаток, тому двоступінчасті відцентрові вентилятори мають, як правило, колеса з лопатками, загнутими назад або, що закінчуються радіально. Трьох- і більш ступінчасті вентилятори через їх конструктивну складність у вентиляторобудуванні майже не зустрічаються.

1.2. Аналіз робочих коліс відцентрових вентиляторів

Степанов А.И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. Теория, конструирование и применение. – М.: гос. изд. науч.-техн. машстрой. лит., 1960.-346 с

Вентилятори належать до класу турбомашин, призначених для нагнітання повітря, газу або пари при низьких тисках. Зазвичай за нормами прийнято все повітродувки та газодувки, що дають збільшення густини менш ніж на 7%, вважають вентиляторами. Для повітряних компресорів це відповідає ступеню стиснення порядку 1,10. Вентилятори застосовуються при низьких тисках на всмоктуванні (атмосфера або нижче) та відрізняються легкою конструкцією корпусів, пристосованих взагалі для невеликих тисків на нагнітання. Тому особливістю конструкції вентиляторів є зварні корпуси і простота гідравлічних форм, що відрізняють їх від компресорів рівних з ними ступенів стиснення.

Витрати вентиляторів можуть досягати $2800 \text{ м}^3/\text{хв}$ і більше і мають інтервал питомих швидкохідностей від 62 до 2050 (за статичним натиском в м).

На рис. 1.5 наведені криві зміни ККД, обчислені за статичними напорами.

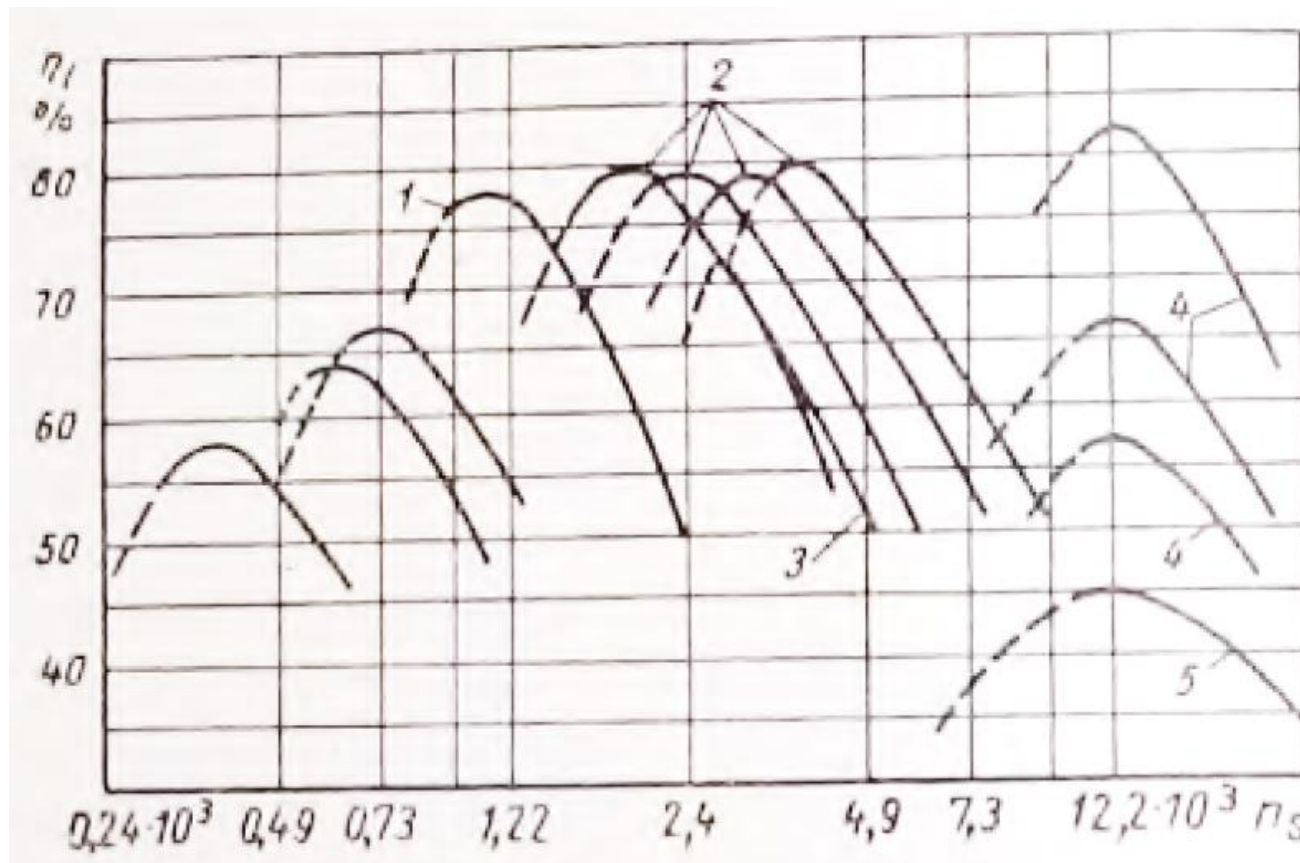


Рис. 1.5 - Зміна статичного ККД з вентиляторів і компресора в залежності від питомої швидкохідності (за статичним натиском): 1 - компресор високого тиску; 2 - вентилятори з лопатками, загнутими назад; 3 - вентилятори з лопатками, загнутими вперед; 4 - осьові вентилятори з лопатковим напрямним апаратом; 5 - пропелерні вентилятори.

Зміни величин ККД на 15-30% для вентиляторів, що мають однакові швидкохідності, пояснюється тим, що в різних конструкціях застосовуються різні гідравлічні форми та технологія, що забезпечують задану за технічними умовами роботу. При вивченні теорії та конструкції вентиляторів можна їх розділити на три групи:

- відцентрові вентилятори;
- вентилятори типу Сірокко (з колісами типу «біляча клітка»);
- осьові вентилятори.

За рис. 1.5. відцентровим вентиляторам належить область зміни питомих швидкохідностей до $0,82 \cdot 10^3$. У відцентрових вентиляторах передача потужності потоку та забезпечення тиску відбуваються аналогічно відцентровим повітродувкам та компресорам; отже, до них застосовна та сама теорія. Різниця між цими машинами, за умови однакового конструктивного виконання, полягає в тому, що вентилятори мають нижчі ККД і нижчі коефіцієнти напору та витрати.

Це порівняльне погіршення показників вентиляторів пояснюється нижчими вимогами до їхньої проточної частини за рахунок спрощення конструкції та технології виготовлення для отримання менших габаритів та вартості.

Загальна тенденція розвитку конструкцій вентиляторів полягає у застосуванні листових зварних елементів та ажурності їх компонування. У малогабаритних вентиляторах доцільно застосування литих коліс та корпусів, але в цьому випадку вентилятори вже належать до класу повітродувок.

Соломахова Т. С., Чебышева К. В. Центробежные вентиляторы. Аэродинамические схемы и характеристики: Справочник — М.: Машиностроение, 1980. — 176 с.

Лопатки робочого колеса мають циліндричну форму; їх встановлюють перпендикулярно до площини заднього диска. Геометричні параметри такої лопатки визначаються перетином, перпендикулярним осі обертання колеса, в якому задані кути β_1 входу та β_2 вихода лопаток, а також діаметр D_1 , на якому розташовані їх вхідні кромки (рис. 1.6). Зазвичай діаметр входу лопаток або близький до діаметра входу вентилятор D_0 , або збігається з ним.

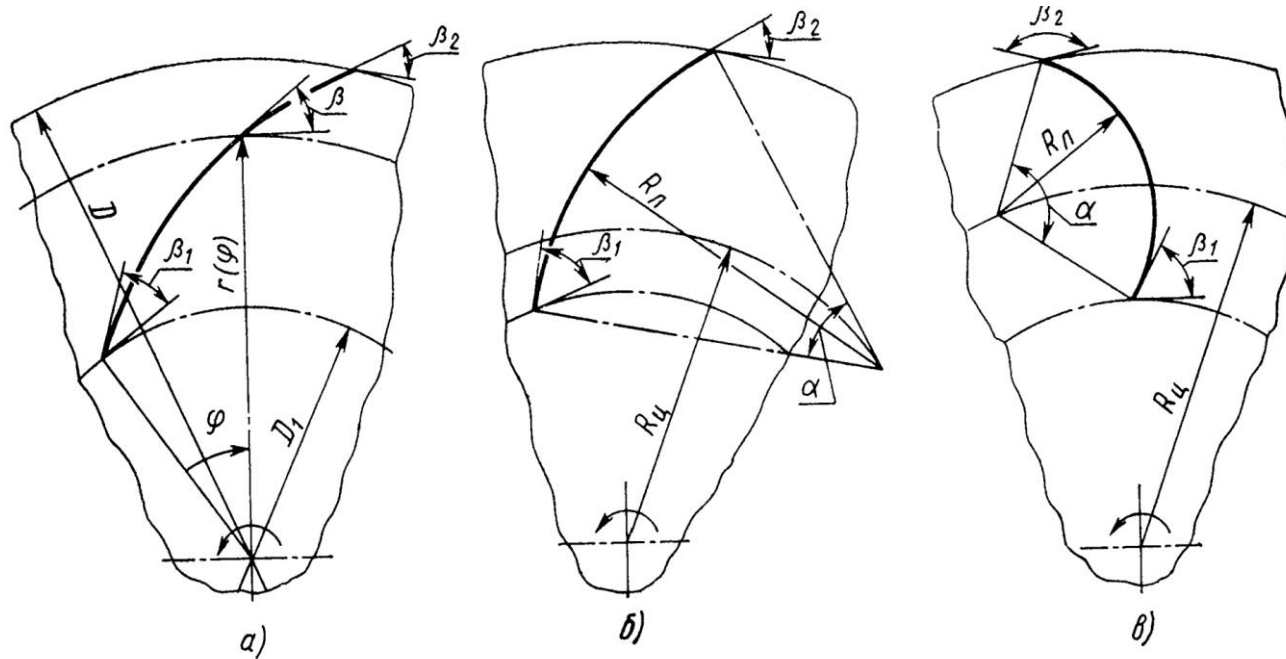


Рис 1.6 – Конструкції лопаток робочих коліс: а, б – загнуті назад; в – загнуті вперед

Залежно від величини кута виходу лопатки робочого колеса прийнято називати загнутими назад ($\beta_2 < 90^\circ$), загнутими вперед ($\beta_2 > 90^\circ$) і радіальними ($\beta_2 = 90^\circ$). Лопатки можуть бути тонкими (листовими) або профільними. Часто криволінійні лопатки бувають окреслені однією дугою або кількома дугами кола.

У разі коли лопатка окреслена однією дугою кола, радіус цього кола R_π виражають через кути β_1 і β_2 і діаметри D_1 і D , тобто

$$R_\pi = \frac{D^2 - D_1^2}{4(D \cdot \cos(\beta_2) - D_1 \cdot \cos(\beta_1))} \quad (1.1)$$

У цьому випадку радіус R_π дорівнює радіусу кривизни лопатки; його знак буде позитивним для лопаток, загнутих назад, і негативним для лопаток, загнутих вперед і радіальних плоских. Радіус кола, на якому розташовані центри дуг лопаток

$$R_\eta = \sqrt{0.25 \cdot D_1^2 + R_\pi^2 - R_\pi \cdot D_1 \cdot \cos(\beta_1)} \quad (1.2)$$

Довжина лопатки

$$L = \frac{\pi \alpha R_\eta}{180} \quad (1.3)$$

де α - кут (у градусах), під яким лопатка видно з центру її дуги.

Плaskі лопатки можна розглядати як окремий випадок кругових лопаток, у яких $R_d = \infty$. З формули (1.1) отримаємо співвідношення

$$D \cdot \cos(\beta_2) = D_1 \cdot \cos(\beta_1) \quad (1.4)$$

встановлює залежність між кутами β_1 і β_2 і діаметрами D_1 і D плоских лопаток. Довжина лопатки

$$L = 0.5(D \sin \beta_2 - D_1 \sin \beta_1) \quad (1.5)$$

Для лопаток, окреслених відрізком логарифмічної спіралі

$$r = r_1 e^{\rho \lg \beta} \quad (1.6)$$

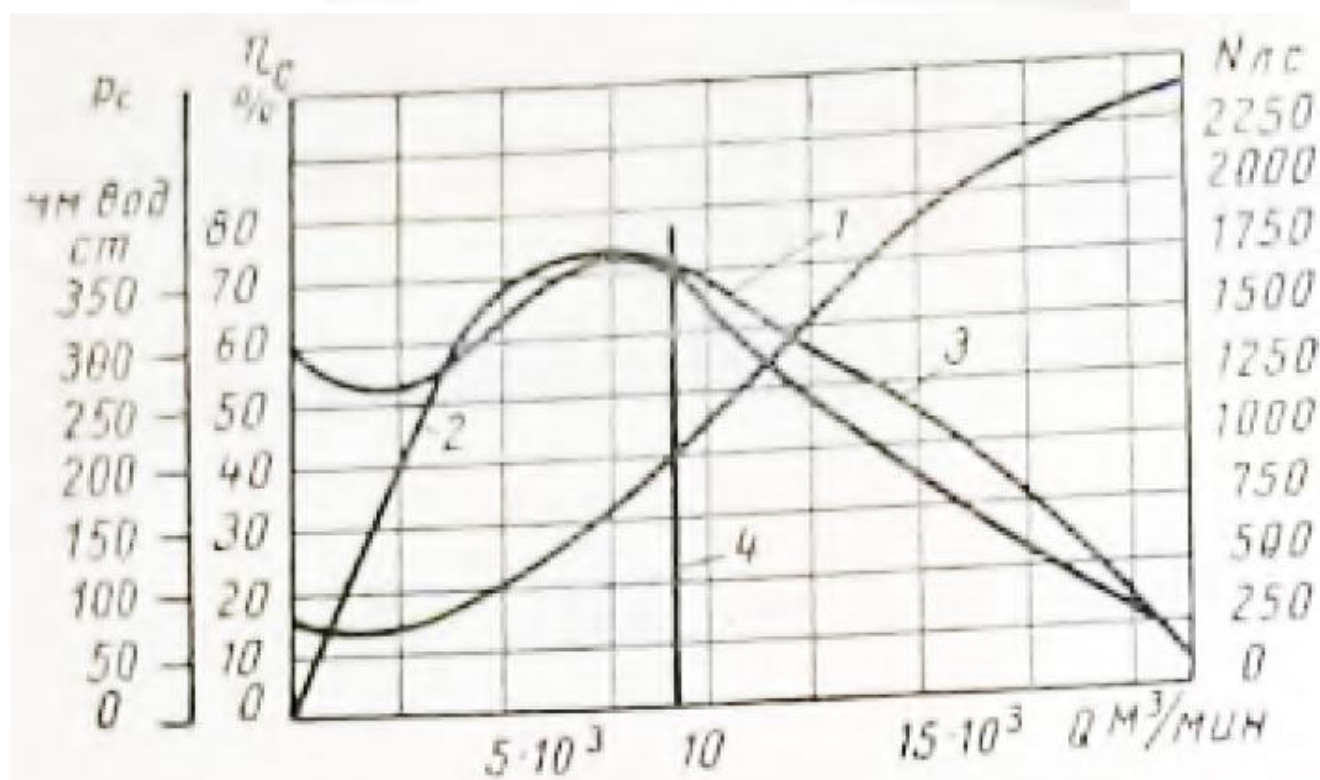
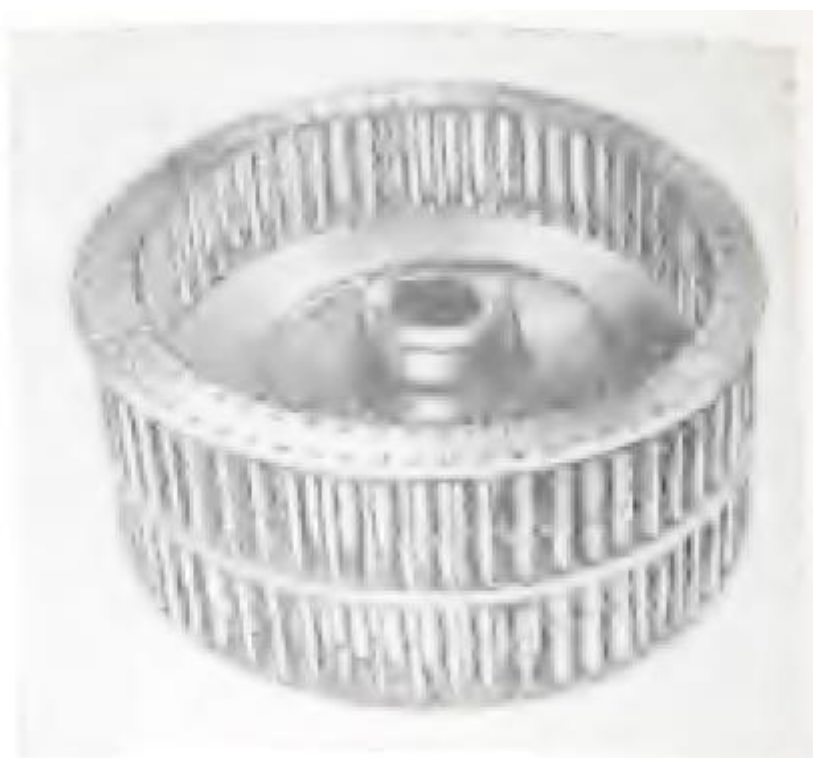
де $r_1 = 0,5 D_1$; β - кут спіралі.

За таких лопаток кут $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, а довжина лопатки

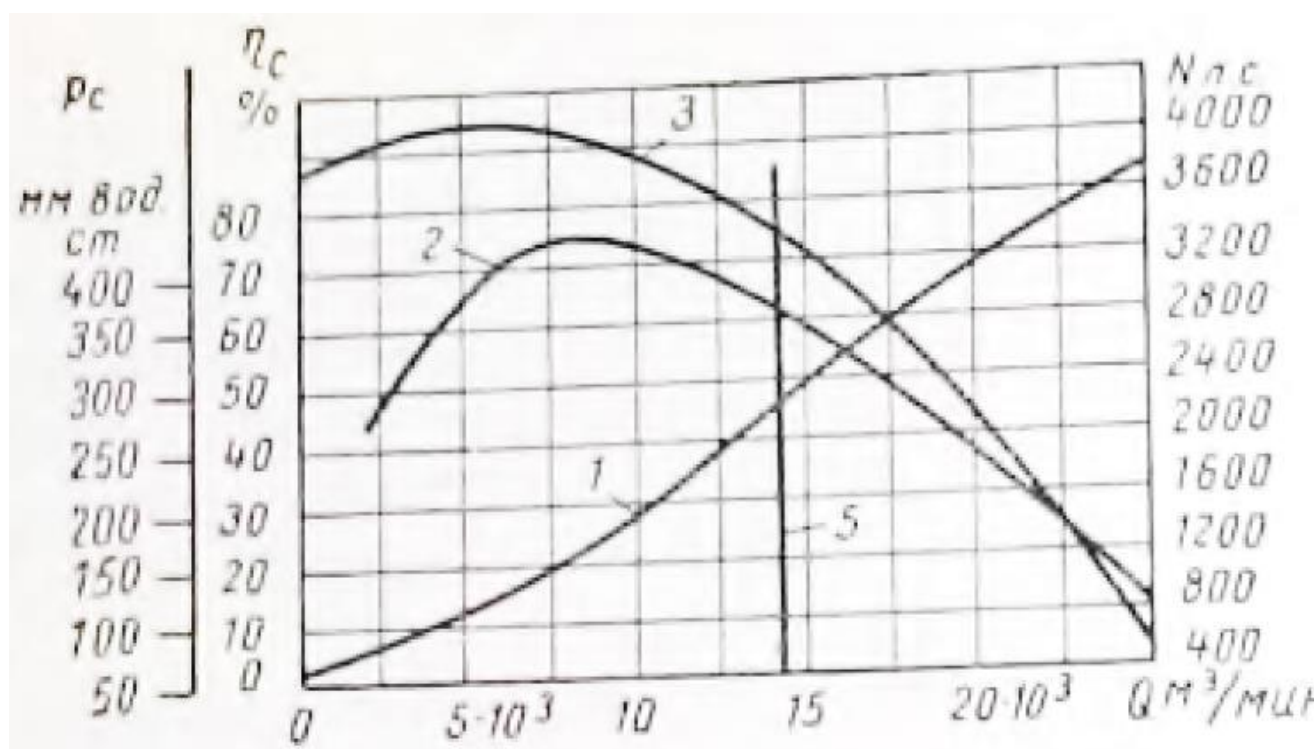
$$L = \frac{0.5(D - D_1)}{\sin \beta} \quad (1.7)$$

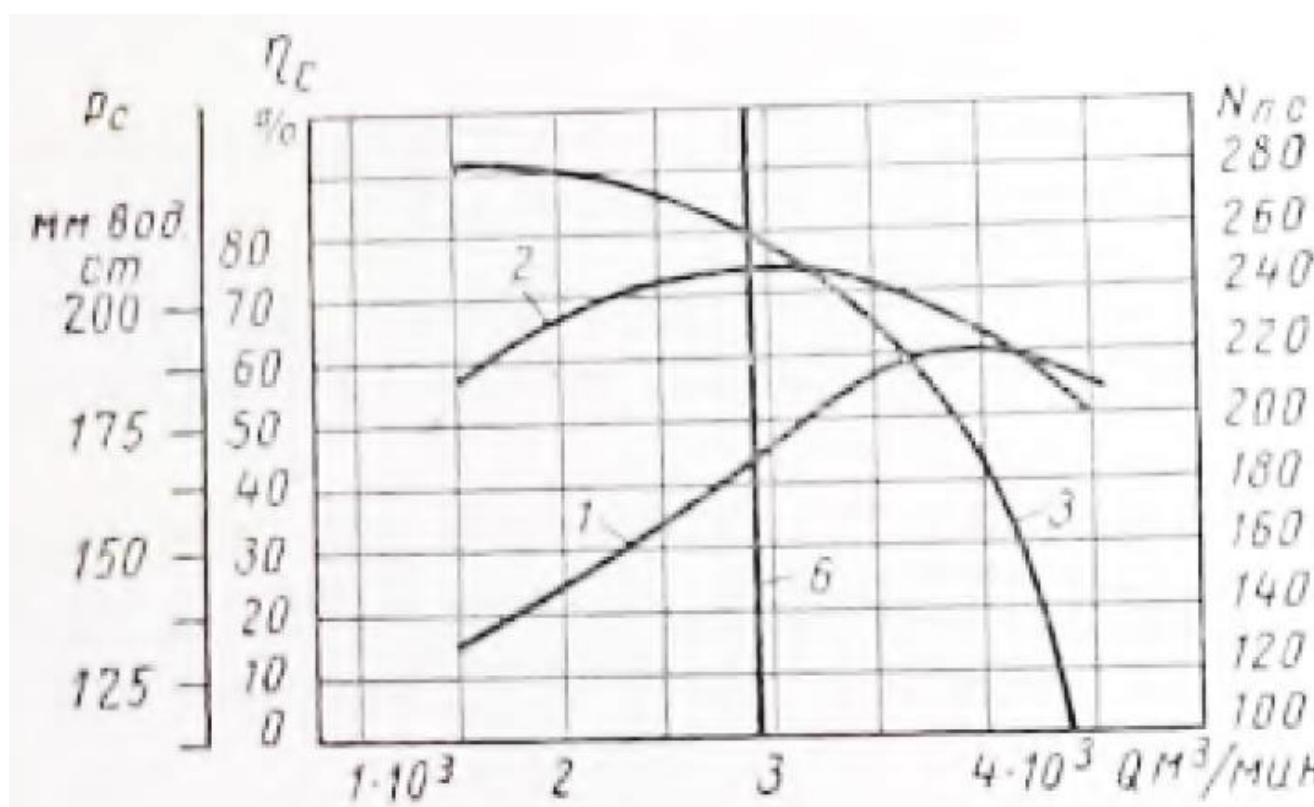
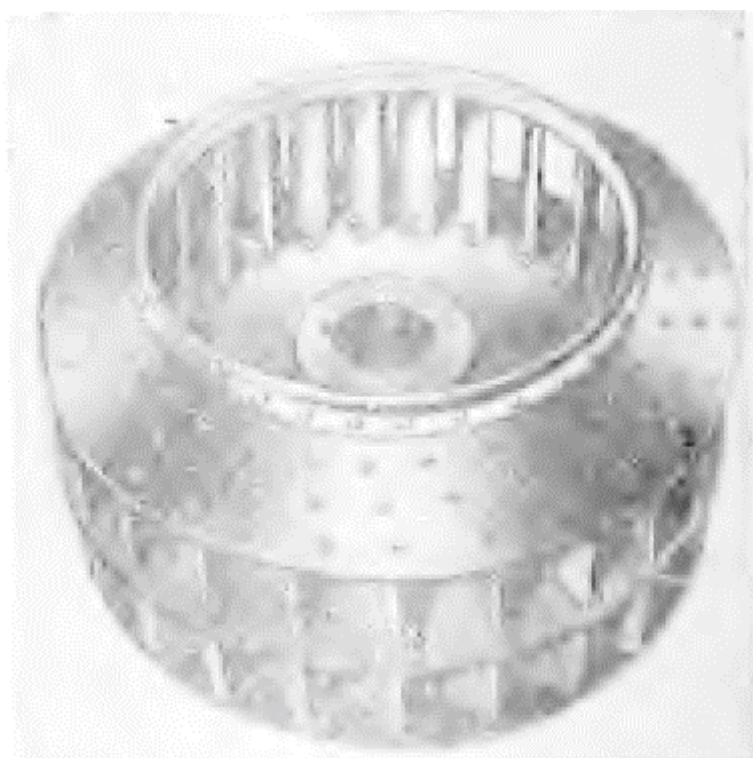
Степанов А.И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. Теория, конструирование и применение. – М.: гос. изд. науч.-техн. машстрой. лит., 1960.-346 с

На рис 1.7 показано чотири типи конструкцій робочих коліс вентиляторів, що представляють відцентрові колеса високих питомих швидкостей (615-820). Там же дано характеристики їхньої роботи у відповідних для кожного типу кожухах.

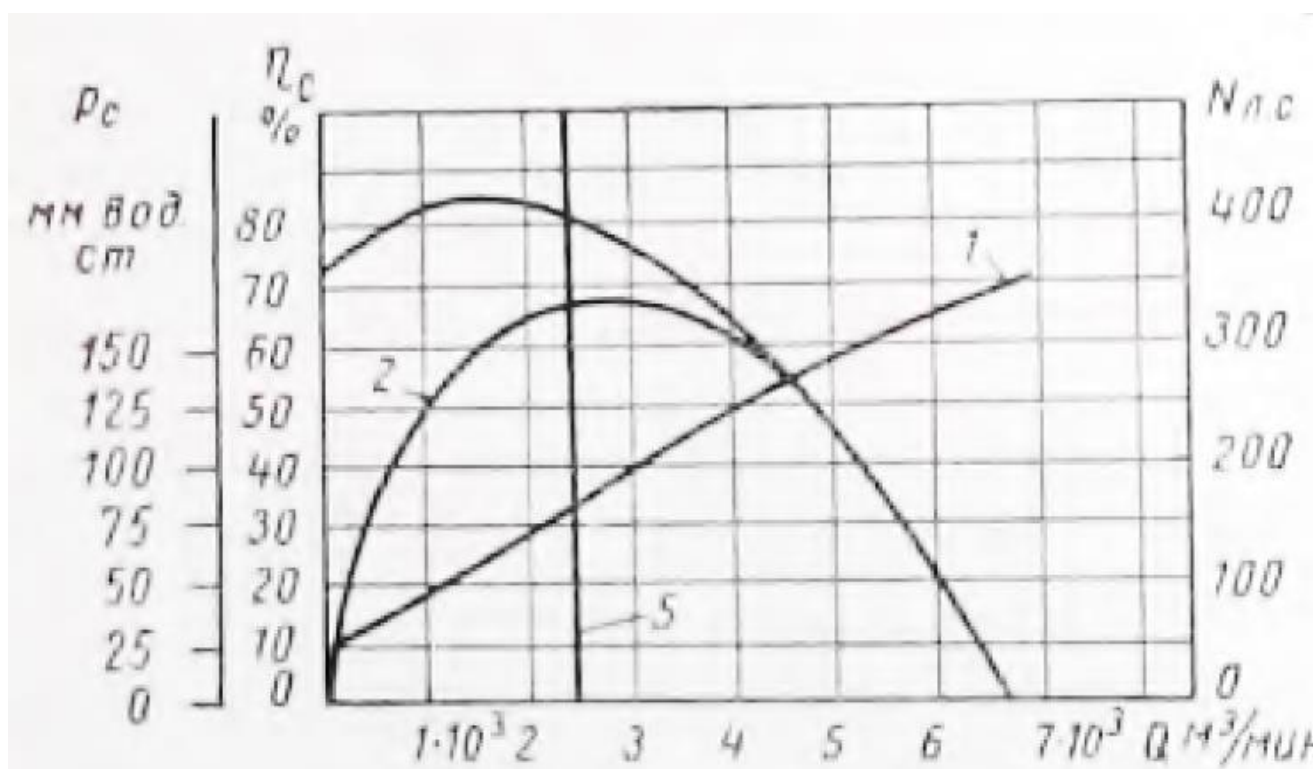


a





B



г

Рис 1.7 - Типи конструкцій робочих коліс та відповідні їм характеристики: - Витрата повітря (для двох вентиляторів): 1 - ефективна потужність N на валу (для двох вентиляторів); 2 - статичний ККД η_c ; 3 - статичний тиск p_c ; 4 - оптимальний режим; 5 - розрахунковий режим; 6 - нормальна робота

Хоча закрутка ніколи не досягає зазначеної величини, застосування вхідних кутів, рівних 90° , помітно знижує як тиск, так і пропускну здатність машини.

Таким чином, для отримання одного і того ж напору та витрати потрібна машина великих розмірів. Встановлено, що при застосуванні кутів, рівних 90° , тобто кутів, більших за нормальні застосовувані, ККД знижується приблизно на 10%.

2. Профілі робочих коліс спрощені відповідно до простоти технології виготовлення зварних листових конструкцій. Така конструкція зазвичай не передбачає в гідравлічному відношенні добрих впускних патрубків. Для полегшення повороту потоку машині на 90° у ній робиться дуже мало або взагалі нічого не робиться.

3. Для малогабаритності конструкцій корпусів у вентиляторах застосовуються тільки спіральні кожухи. У жодних конструкціях вентиляторів не застосовуються лопаткові або безлопаткові дифузори. У спіральних кожухах зменшення габаритів основні кола робляться по можливості мінімальними. Зменшення зазору між колесом і язиком спіралі нижче оптимуму, встановленого для відцентрових насосів і повітродувок, знижує ККД. У вентиляторах відсутні будь-які конструктивні заходи для більш ефективного перетворення швидкісного напору в тиск, як наприклад, застосування між спіраллю і випускним фланцем дифузора. Крім того, у вентиляторах нагнітальні патрубки часто робляться значно більшими перерізами, ніж прохідний переріз спіралі, що призводить до раптового падіння швидкості повітря при виході зі спіралі.

На рис. 1.9 показані для порівняння схеми двох спіральних кожухів – одного з нормальним нагнітаючим патрубком, іншого - зі скороченим.

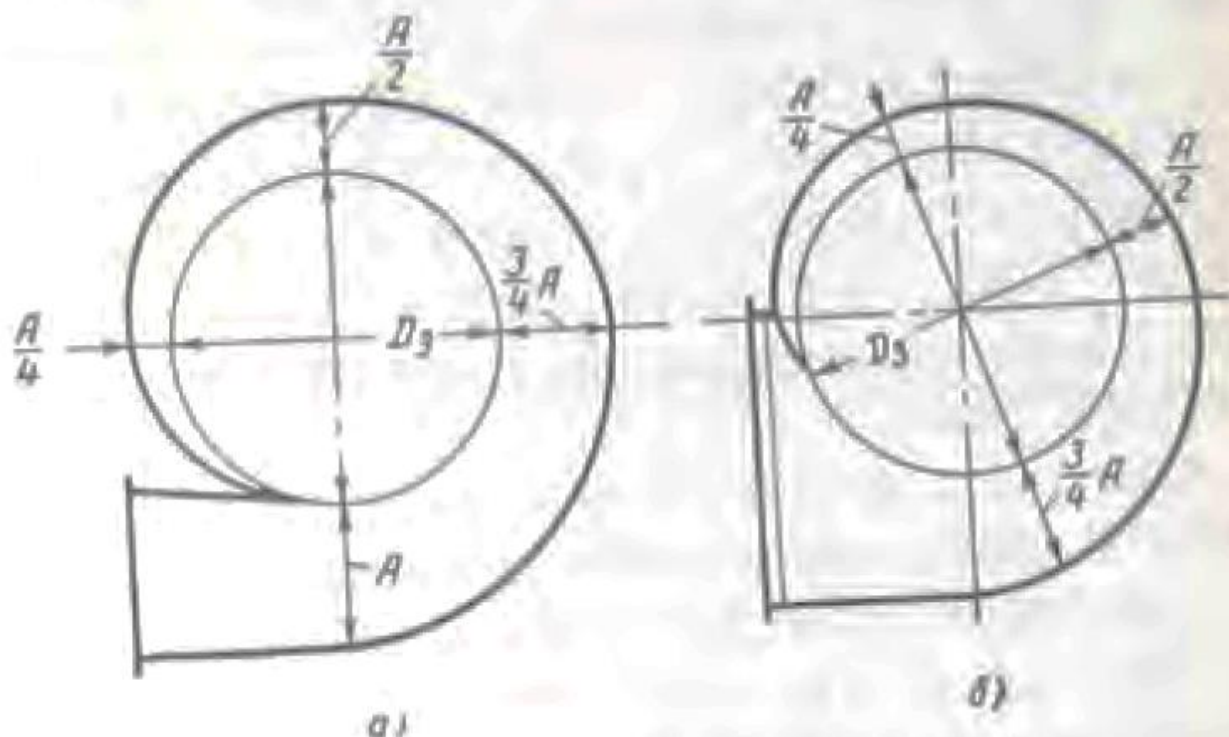


Рис 1.9 – Схеми спіральних кожухів

У нормальній конструкції спіралі, прохідні перетини збільшуються пропорційно кутовому зміщенню радіус-вектора: починаючи від нульової точки (язика спіралі) і кінчаючи повним колом. В укорочених конструкціях спіралей біля $\frac{1}{4}$ кола колеса перекривається вихідним перетином спіралі, чим порушується відновлення нормального тиску в спіралі, а також нормальний розподіл, швидкостей на виході.

Середня швидкість на виході зі спіралі повинна становити близько половини абсолютної швидкості на виході з колеса. Недоліки незамкнутості спіралі (укорочена спіраль) і неефективність перетворення швидкісного напору на тиск призводять до зменшення ККД (залежно від швидкохідності і ступеня відхилення від нормальної конструкції) на 6–12%. При квадратному або прямокутному вихідному патрубку спірального корпусу перерізу спіралі можуть бути прямокутними, трапецеїдальними або комбінованими. Спіралі з комбінованими прохідними перерізами бувають у коліс з малими питомими швидкохідностями.

4. Для вентиляторів низького тиску і великих об'ємних витрат (високі питомі швидкохідності) втратами на витоку між деталями, що обертаються, і нерухомими стінками корпуса можна знехтувати. З цієї причини у вентиляторах не роблять спеціальних ущільнень. При низькій питомій швидкохідності втрати на витоку, виражені у відсотках потужності, що витрачається на приводі, зі зменшенням швидкохідності швидко збільшуються і можуть на кілька одиниць знизити ККД.

Колеса типу «біляча клітка» або типу Сірокко, являють собою особливий клас коліс, що не підходить ні до одного з існуючих типів, що утворюють безперервний (в механічному і гідравлічному відношенні) ряд подібних лопаткових машин. Колеса вентиляторів цього типу мають велику кількість циліндричних лопаток, призначених для забезпечення максимального активного впливу колеса на газовий потік. Незважаючи на те, що динаміка впливу цих лопаток дуже близька до динаміки лопаток гідравлічних коліс Пельтон, ККД коліс Сірокко невисокий, оскільки відсутня можливість ефективного перетворення абсолютної швидкості тиску.

Напори, створювані колесами Сірокко, значно вищі за напори нормальних відцентрових коліс з кутами лопаток, що не перевищують 90° . За допомогою таких коліс отримані коефіцієнти напорів $\psi = 1,2$ на режимах оптимальних ККД. Середнє значення ψ для малих агрегатів складають біля 1,10 визначені за нопором. Аналіз швидкостей при оптимальних ККД показує, що залежності між швидкостями колесам Сірокко аналогічні залежностям у водяних колесах Пельтон. Це підтверджує, що активна дія на потік є найкращим засобом отримання великих напорів.

Механічні та гідравлічні конструктивні елементи активних коліс встановлені у вузькому інтервалі з великою надійністю. Як показано на рис. 1.10 і 1.11, лопатка активних коліс зазвичай є частиною кругової дуги з центральним кутом $\delta = 90^\circ$.

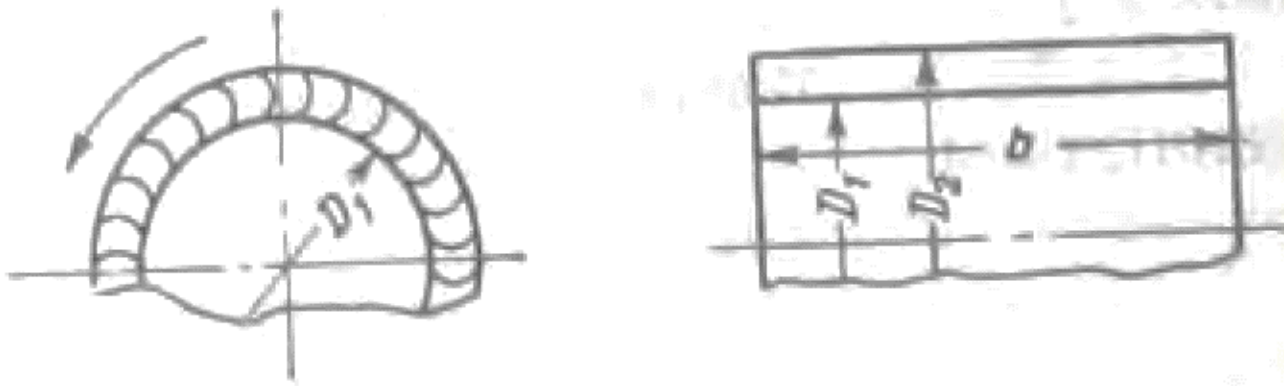


Рис. 1.10 - Активне робоче колесо

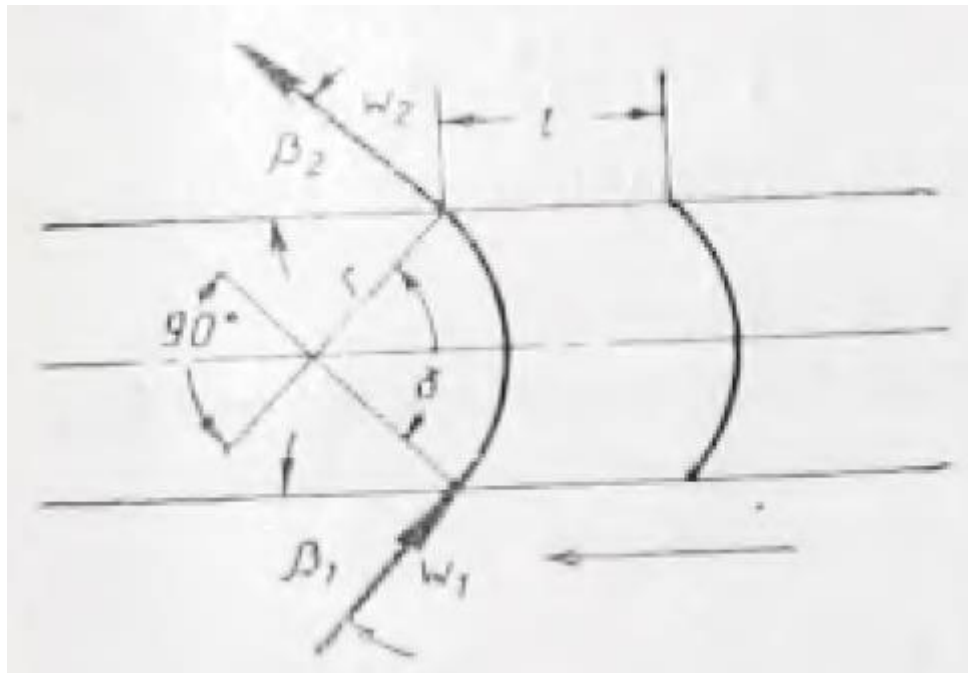


Рис 1.11 - Елементи лопатки вентилятора Сірокко

У загальному випадку

$$\delta = 180 - (\beta_1 + \beta_2) \quad (1.8)$$

При дуже малих товщинах лопаток і при паралельних бічних стінках дисків з умови нерозривності отримуємо

$$\pi D_1 b_1 \omega_1 \sin(\beta_1) = \pi D_2 b_2 \omega_2 \sin(\beta_2) \quad (1.9)$$

оскільки $b_2 = b_1 = b$ і $\omega_1 = \omega_2$, то

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{\sin(\beta_2)}{\sin(\beta_1)} \quad (1.10)$$

Для $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$ маємо

$$\frac{D_1}{D_2} = \operatorname{tg}(\beta_2); \quad \frac{D_2}{D_1} = \operatorname{tg}(\beta_1); \quad (1.11)$$

Відношення $\frac{D_1}{D_2}$ змінюються не більше 0,8 - 0,95. Часто використовуються значення 0,875.

Для відношення $\frac{D_1}{D_2} = 0,875$ величина $\beta_1 = 41^\circ$ і $\beta_2 = 49^\circ$. Для лопаток, загнутих вперед, отримане значення для β_2 відповідає куту 139° .

По трикутнику швидкостей на вході, показаному на рис. 1.12

$$c_{m1} = u_1 \operatorname{tg}(\beta_1) = u_1 \left(\frac{D_2}{D_1} \right) = u_2 \quad (1.12)$$

З трикутника швидкостей на виході (рис. 1.13) маємо

$$\begin{cases} c_{u2} = u_2 + c_{m2} \operatorname{tg}(\beta_1); \\ c_{m2} = \frac{c_{m1}}{\operatorname{tg}(\beta_1)}; \quad c_{m1} = u_2 \\ c_{u1} = 2u_2 \end{cases} \quad (1.13)$$

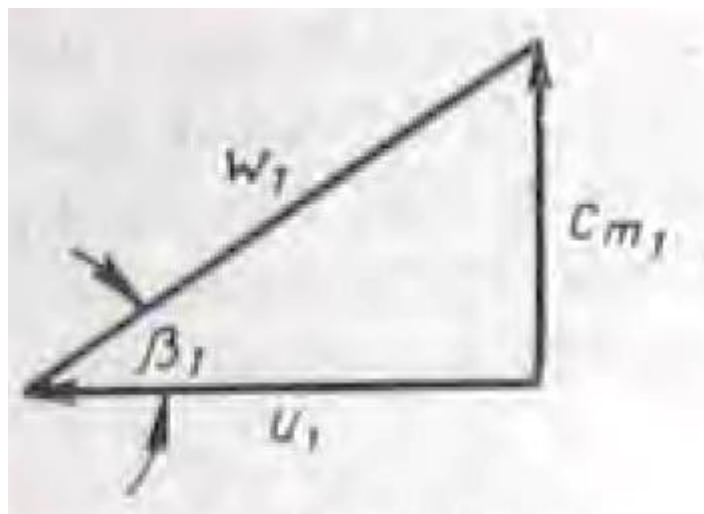


Рис 1.12– Трикутник швидкостей на вході

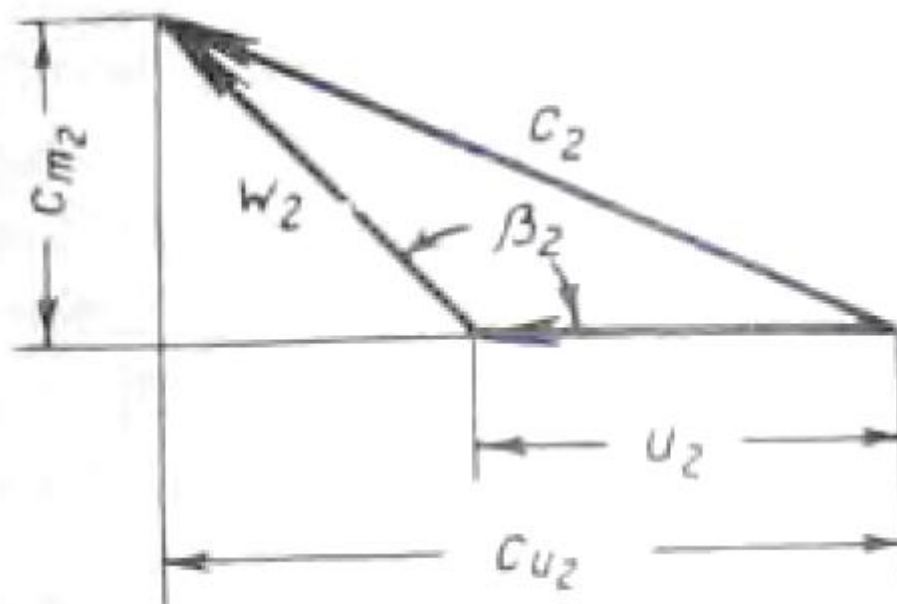


Рис 1.13 – Трикутник швидкостей на виході

Таким чином, абсолютна швидкість газу, що сходить з лопатки (теоретично), дорівнює подвоєної окружної швидкості колеса. Ця умова відповідає максимальній корисній роботі водяної турбіни, тобто умові, за якої окружна швидкість колеса дорівнює половині швидкості струменів.

З рівняння (1.6) маємо

$$\psi_e = \frac{c_{u2}}{u_2} = 2,0 \quad (1.14)$$

Відношення дійсного коефіцієнта натиску до теоретичного (Ейлера) рівне

$$\frac{\psi}{\psi_e} = \frac{1,2}{2} = 0,6 \quad (1.15)$$

що значно менше величин, одержуваних у відцентрових повітродувках (0,691), і пояснюється неефективним перетворенням в корпусі швидкості тиску.

Визначимо кількість лопаток. Нехай t позначає лінійний крок лопаток, тоді число лопаток z дорівнює

$$z = \frac{\pi D_2}{t} \quad (1.16)$$

Зазвичай крок t приймають рівним від 0,7 до 1 r . Радіус лопаток дорівнює

$$r = (D_2 - D_1) \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \quad (1.17)$$

У активних коліс застосовується від 24 лопаток для малих агрегатів до 64 лопаток для великих моделей вентиляторів діаметром понад 760 мм.

Витрата колеса Сірокко змінюється внаслідок зміни ширини b . Нормальна витрата обмежується розміром діаметра отвору, що всмоктує. З умови нерозривності величина активного перерізу на вході в лопатки πDb повинна дорівнювати площі всмоктуючого отвору, в результаті чого маємо $b = D_1/4$.

При збільшенні ширини колеса понад отримане значення b зростає витрата (не пропорційно до збільшення ширини b) і одночасно може зменшитися ККД.

Середня питома швидкохідність вентиляторів Сірокко з одностороннім всмоктуванням (обчислена за статичним натиском у м та за об'ємною витратою Q в м³/хв) дорівнює приблизно $n_s \approx 485$.

ККД таких вентиляторів за сприятливих умов роботи, обчислені за статичними напорами, трохи вище 70%. Вентилятори Сірокко будуються із розмірами коліс від 76 до 3350 мм. Однією з причин, що затримують розвиток вентиляторів Сірокко є вузький інтервал нормальних умов роботи цих вентиляторів; при зміщенні режимної точки роботи вентилятора вправо або вліво від точки оптимального ККД з'являється під час роботи сильний шум. Крім того, робота на підвищених тисках проходить близько від помпажної лінії, а при роботі на низьких тисках може вийти перевантаження приводу, так як крива потужності, витрачається приводом, зі збільшенням витрати різко піднімається.

1.3. Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження

Метою роботи є покращення режиму роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка» за рахунок обґрунтування раціональних параметрів лопатей робочого колеса.

Об'єкт досліджень – процес роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка».

Предмет дослідження – параметри лопатей робочого колеса типу «біляча клітка» відцентрового вентилятора.

Завдання досліджень:

1. Проведення аналізу шляхів покращення характеристик вентиляторів за рахунок профілей лопатей;
2. Проведення аналізу профілів лопаток відцентрових вентиляторів;
3. Дослідження на основі комп'ютерного моделювання профільованих лопатей робочого колеса вентилятора;
4. Дослідження центральної частини робочого колеса вентилятора;
5. Розробка рекомендацій щодо виготовлення профільованих лопаток відцентрових вентиляторів.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ УДАРНИХ НАПРУЖЕНЬ У МАТЕРІАЛІ

ПОРШНЯ-УДАРНИКА

2.1. Загальна методика досліджень

Підвищення ефективності компонентів систем вентиляції та пневмотранспорту промислових підприємств стає необхідністю для забезпечення компромісу між уловлюванням частинок та споживанням енергії.

Вентилятор типу «біляче колесо» (SCF), також відомий як багатолопатковий відцентровий вентилятор із загнутими вперед лопатками, десятиліттями широко використовується в системах ОВК та інших побутових приладах, таких як вентиляція у ванних кімнатах та кухонних витяжках. Загалом, вентилятори цього типу схильні до відриву потоку навколо лопаток через їхній двовимірний дугоподібний профіль. Вони також страждають від нерівномірності потоку на вході в робоче колесо через різкий поворот напрямку потоку. Ці механізми та закономірності потоку призводять до зниження продуктивності SCF та збільшення споживання енергії. Таким чином, необхідне поліпшення умов потоку всередині вентилятора типу «біляче колесо».

Згідно з розробленими завданнями досліджень, плануються наступні етапи досліджень.

Преший етап включає проведення аналізу шляхів покращення характеристик вентиляторів за рахунок профілів лопатей. Як відомо, профілювання лопаток вентилятора дає низку істотних переваг, спрямованих на покращення його аеродинамічних характеристик, зниження енергоспоживання та зменшення шуму.

На другому етапі планується проведення аналізу профілів лопаток відцентрових вентиляторів. Для лопаток відцентрових вентиляторів важливим критерієм є аеродинамічна якість – відношення підйомної сили до лобового опору (Cl/Cd), оскільки це безпосередньо впливає на ККД та ефективність роботи вентилятора.

На наступному етапі планується проведення дослідження на основі комп'ютерного моделювання профільованих лопатей робочого колеса вентилятора. У дослідженні за основу береться вентилятор В-Ц14-46-5.

Додатково планується проведення дослідження центральної частини робочого колеса вентилятора. Однією з вад відцентрових вентиляторів загалом, і колеса типу «біляче колесо» зокрема, є нерівномірності потоку на вході в робоче колесо через різкий поворот напрямку потоку, що призводять до зниження продуктивності та зростання енергоспоживання. Метою цього етапу є визначення впливу геометрії центральної частини робочого колеса на поліпшення умов потоку. Як вихідні дані приймається геометрія колеса з профільованими лопатями, що була визначена на попередньому етапі досліджень.

На фінальному етапі планується розробка рекомендацій щодо виготовлення профільованих лопаток відцентрових вентиляторів. Проводиться консолідований огляд основних технологій серійного виготовлення профільованих лопатей з оцінкою їх придатності, переваг та недоліків, типових матеріалів, діапазонів серійності та ключових вимог (дочірна обробка, контроль якості, балансування). Критерії вибору: матеріал (сталь, алюміній, нержавіюча сталь, пластик, композити), геометрична складність профілю НАСА, точність і шорсткість поверхні, жорсткість та втомна міцність, маса лопаті, обсяг виробництва, вартість оснастки та одиничної деталі, вимоги до логістики та часу виготовлення.

2.2. Аналіз шляхів покращення характеристик вентиляторів за рахунок профілей лопатей

Як відомо, покращення характеристик вентиляторів можливо за рахунок профілювання лопаток вентилятора дає низку істотних переваг, спрямованих на покращення його аеродинамічних характеристик, зниження енергоспоживання та зменшення шуму

Основні переваги профілювання лопаток:

1. Підвищення ефективності та загального тиску:

- Оптимізація лопаток дозволяє подолати технічні проблеми багатолопаткових відцентрових вентиляторів, такі як низький ККД та недостатній загальний тиск.
- Поліпшення аеродинамічних характеристик лопаток безпосередньо визначає продуктивність вентилятора.
- Вентилятори з оптимізованими лопатками продемонстрували підвищення ефективності на 3-7% та розширений діапазон високоефективної витрати повітря.
- Відзначено збільшення загального тиску до 20%.
- Використання ефективної глобальної оптимізації (EGO) може призвести до покращення ефективності до 8,46%.
- Застосування моделі Кренкінга дозволило збільшити ефективність на 4,21% порівняно з вихідною конструкцією
- Більш високе прикріплення потоку до лопаток призводить до більш високої ефективності.

2. Зниження енергоспоживання:

- Оптимізовані вентилятори демонструють значне зниження споживаної потужності.

3. Поліпшення характеристик потоку та зниження втрат:

- Профілювання лопаток дозволяє досягти великого відношення підйомної сили до лобового опору, що важливо для кращої функціональної потужності та аеродинамічних характеристик вентилятора.
- Мінімізація області вихрового сліду та струминно-вихрової течії ефективно запобігає відриву прикордонного шару та пригнічує його розвиток.
- Поліпшене профілювання, наприклад, з використанням аеродинамічних профілів (airfoil blades), призводить до послаблення вихрової структури, придушення струминно-вихрової течії та зменшення зони вихорів, що робить розподіл швидкості більш рівномірним.

- Це також зменшує явище рециркуляції (зворотного потоку) у кожному каналі лопатки, яке у стандартних лопаток може призводити до значних втрат енергії.
- Прикріплення потоку до лопаток покращується, що підвищує ефективність.
- У неоптимізованих конфігураціях спостерігається сильний вихор між відсіканням та робочим колесом, що призводить до зниження повного тиску та відриву потоку на лопатках.

4. Зниження шуму:

- Оптимізація профілю лопаток є найбільш ефективним методом зниження шуму.
- Зміна геометрії лопаток, наприклад, їх довжини або кута установки, може значно вплинути на рівень шуму, включаючи тональний та широкопasmовий шум.
- Скорочення довжини лопаток на 31,7% дозволило знизити шум без втрати ефективності, тоді як скорочення на 43,8% не призвело до бажаного ефекту та знизило ефективність.

5. Спрощення виробництва та підвищення точності:

- Профілювання лопаток робочого колеса забезпечує правильне встановлення лопатки на диску, що несе, і точне дотримання заданих кутів, що може покращити технологію їх виробництва.

Отже, профілювання лопаток вентилятора є ключовим аспектом у проектуванні та оптимізації відцентрових вентиляторів, дозволяючи досягати більш високих показників ефективності, знижувати шум та споживання енергії, а також покращувати стабільність та розподіл повітряного потоку.

Найчастіше застосовуються профільовані лопатки, окреслені дугою кола (рис 2.1).

Радіус лопаток колеса:

$$R_{\text{л}} = \frac{(0,5 \cdot D_2)^2 - (0,5 \cdot D_1)^2}{D_2 \cdot \cos(\beta_{2\text{л}}) - D_1 \cdot \cos(\beta_{1\text{л}})} \quad (2.1)$$

- Застосування лопаток з авіаційним профілем дозволяє подолати технічні проблеми багатолопаткових відцентрових вентиляторів, такі як низький ККД та недостатній повний тиск.
- Експерименти показали збільшення ефективності багатолопаткового відцентрового вентилятора на 3–7% порівняно з однокриволінійними лопатками.
- Вентилятор з лопатками A-airfoil продемонстрував підвищення ефективності на 3–7% у діапазоні загальних робочих умов, а діапазон високоефективного потоку було розширено з 450 до 650 м³/год.
- Одне з досліджень, що використовує оптимізацію на основі моделі Кренкінга для профілю лопаток (NACA), показало покращення ефективності на 4,21% порівняно з вихідною конструкцією.
- Більш високе прикріплення потоку до лопаток (що характерно для оптимізованих профілів, таких як NACA) призводить до більш високої ефективності.

2. Збільшення повного тиску:

- Вентилятор із лопатками, спроектованими з використанням авіаційного профілю, демонструє суттєве збільшення повного тиску.
- В одному з досліджень повний тиск A-airfoil вентилятора був у середньому на 50 Па вище, ніж у вентилятора з однокриволінійними лопатками, що становить збільшення більш ніж на 20%, особливо в області високих витрат повітря.

3. Зниження енергоспоживання:

- Конструкція лопаток з авіаційним профілем може значно знизити споживану потужність вентилятора. Максимальне зниження потужності сягало 25 Вт.

4. Поліпшення характеристик потоку та придушення небажаних явищ:

- Лопатки з авіаційним профілем ефективно пригнічують вихрову течію (eddy current), вторинні течії (secondary flow) та відрив прикордонного

шару (boundary layer separation) у каналі потоку лопатки, крильчатці та зазорі равлика.

- Вони також пригнічують відрив потоку між крильчаткою та равликом.
- Вентилятор з лопатками A-airfoil демонструє більш рівномірний розподіл швидкості в області крильчатки та слабкішу структуру струминно-вихрового сліду в порівнянні з однокриволінійними лопатками.
- Це призводить до зменшення зони вихорів та покращення умов потоку всередині проточної частини.

5. Високе ставлення підйомної сили до лобового опору:

- Авіаційний профіль характеризується високим ставленням підйомної сили до лобового опору, що є важливим параметром для опису аеродинамічних характеристик.
- Вентилятори з високим ставленням підйомної сили до лобового опору мають кращу функціональну потужність і аеродинамічні характеристики. Це ставлення позитивно корелює з ефективністю вентилятора.

6. Поліпшення кута атаки:

- Конструкція лопаток з авіаційним профілем покращує кут атаки рідини, що надходить у робоче колесо, та знижує чутливість до цього кута.

В цілому, використання авіаційних профілів для лопаток вентиляторів є ефективним методом оптимізації їх продуктивності, дозволяючи досягати значно більш високих показників ефективності, тиску та зниження енергоспоживання за рахунок покращення внутрішніх характеристик повітряного потоку.

Принципи вибору та вимоги до авіаційних профілів для лопаток вентилятора визначаються необхідністю підвищення аеродинамічних характеристик вентилятора, покращення ефективності, збільшення тиску та мінімізації втрат енергії та шуму.

Можна виділити такі принципи та вимоги:

1. Високе ставлення підйомної сили до лобового опору (L/D):

- Це ключовий параметр для опису аеродинамічних характеристик профілю.
- Профіль лопатки повинен забезпечувати більшу підйомну силу при мінімально можливому лобовому опорі.
- Вентилятори з високим ставленням підйомної сили до лобового опору мають кращу функціональну потужність та аеродинамічні характеристики. Наприклад, профіль BE10307B (профіль A) має більше ставлення підйомної сили до лобового опору порівняно профілями NASA0012, NASA2412, NASA4412.

2. Ефективне управління потоком та запобігання відриву прикордонного шару:

- Авіаційні профілі використовуються для подолання таких технічних проблем, як вихори, вторинні течії та відрив прикордонного шару, які характерні для традиційних однокриволінійних лопаток. Ці явища є основною причиною втрати енергії у каналі потоку робочого колеса.
- Метою є мінімізація зон вихрового сліду та струменево-вихрового перебігу, що ефективно запобігає відриву прикордонного шару та пригнічує його розвиток.
- Профіль повинен забезпечувати більш рівномірний розподіл швидкості та ослаблення вихрової структури.

3. Поліпшення загальних аеродинамічних характеристик:

- Вибір профілю повинен призводити до підвищення ефективності та загального тиску вентилятора.
- Лопатка є основним компонентом, що визначає продуктивність вентилятора.
- Для відцентрових вентиляторів з багатолопатевиими робочими колесами авіаційні профілі дозволяють досягти збільшення

ефективності на 3-7% та розширення діапазону високоефективної витрати повітря в порівнянні з однокриволінійними лопатками.

4. Стабільність роботи у різних умовах:

- Профіль повинен забезпечувати стабільну роботу та високу ефективність у діапазоні загальних робочих умов.
- Хоча взаємозв'язок між ставленням підйомної сили до лобового опору та ефективністю може бути прямий лише за певних умов, профіль повинен бути адаптований до передбачуваного діапазону експлуатації вентилятора.

5. Оптимальна геометрія та кути установки:

- Вибір профілю включає комплексний розгляд коефіцієнтів підйомної сили, лобового опору та їх відношення.
- Важливими геометричними параметрами є кути установки лопатки на вході (β_1) та на виході (β_2), а також внутрішній (D1) та зовнішній (D2) діаметри робочого колеса.
- Хорда профілю також є важливим параметром.
- Правильний профіль лопатки повинен забезпечувати точну установку на несучому диску та дотримання заданих кутів.
- Також враховується найбільш вигідна кількість лопаток.

6. Зниження шуму (непрямо):

- Оптимізація профілю лопаток, хоча безпосередньо не розглядається як критерій вибору конкретного авіаційного профілю в цих джерелах, є найбільш ефективним методом зниження шуму вентилятора. Поліпшення аеродинамічних характеристик за рахунок придушення турбулентних явищ сприяє зниженню як тонального, так і широкопasmового шуму.

Таким чином, вибір авіаційних профілів для лопаток вентиляторів заснований на ретельному аналізі їх аеродинамічних властивостей, здатності до управління потоком та впливу на загальну продуктивність вентилятора в заданих робочих умовах.

2.3. Аналіз профілів лопаток відцентрових вентиляторів

Як було встановлено вище для лопаток відцентрових вентиляторів важливим критерієм є аеродинамічна якість - відношення підйомної сили до лобового опору (Cl/Cd), оскільки це впливає на ККД і ефективність роботи вентилятора.

Найбільш придатними для використання в радіальних вентиляторах вважаються профілі серії NASA 4- і 5-значних, зокрема:

- NASA 64-012
- NASA 65-012
- NASA 6412
- NASA 63-412

Однак, якщо говорити про максимальне відношення підйомної сили до лобового опору (аеродинамічну якість) за типових умов експлуатації лопатей вентилятора (числа Рейнольдса $Re = 100\,000 - 500\,000$), то одним із найкращих за цим показником є NASA 6412, що є оптимальним вибором для лопатей відцентрових вентиляторів.

Розглянемо характеристики цього профілю:

- Серія: NASA 6-серії (профілі з ламінарним граничним шаром);
- 6 — серія з поліпшеним розподілом тиску;
- 4 — положення мінімального тиску (40% від передньої кромки);
- 1 — сприятливий градієнт тиску;
- 2 — відносна товщина 12%;
- Тип: Ламінарний профіль, що зменшує опір тертя;

Переваги цього профілю :

- Висока аеродинамічна якість: $Cl/Cd \approx 60-80$ при $Re = 200\,000-300\,000$;
- Стійкий до відриву потоку при помірних кутах атаки;
- Підходить для дозвукових швидкостей (що характерно для вентиляторів).

Порівняння цього профілю з іншими наведено у табл 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри профілів

Профіль	C_{l_max}	C_{d_min}	C_l/C_d (при опт. куті)	Примітка
NACA 6412	~1.2	~0.015	~70–80	Найвища аеродинамічна якість
NACA 63-412	~1.1	~0.016	~65	Теж добре, але трохи гірше
NACA 2412	~1.0	~0.020	~50	Звичайний симетричний профіль
NACA 4412	~1.3	~0.025	~50–55	Вища підйомна сила, але й вищий опір

З табл. 2.1 видно, що у NACA 6412 максимальне C_l/C_d , що є ключовим параметром для ККД, він ефективний у діапазоні чисел Рейнольдса, характерному для вентиляторів, також забезпечує стабільну роботу без значного зростання опору і він часто використовується в промислових вентиляторах, авіамоделюванні та вітроелектрогенераторах.

Оптимальним кутом атаки для цього профілю є 4° – 6° (залежно від режиму).

2.4. Методика комп'ютерного моделювання профільованих лопатей робочого колеса вентилятора

За основу у дослідженні приймаємо вентилятор В-Ц14-46-5, креслення корпусу, робочого колеса та лопатки наведені на рис. 2.2, 2.3, 2.4.

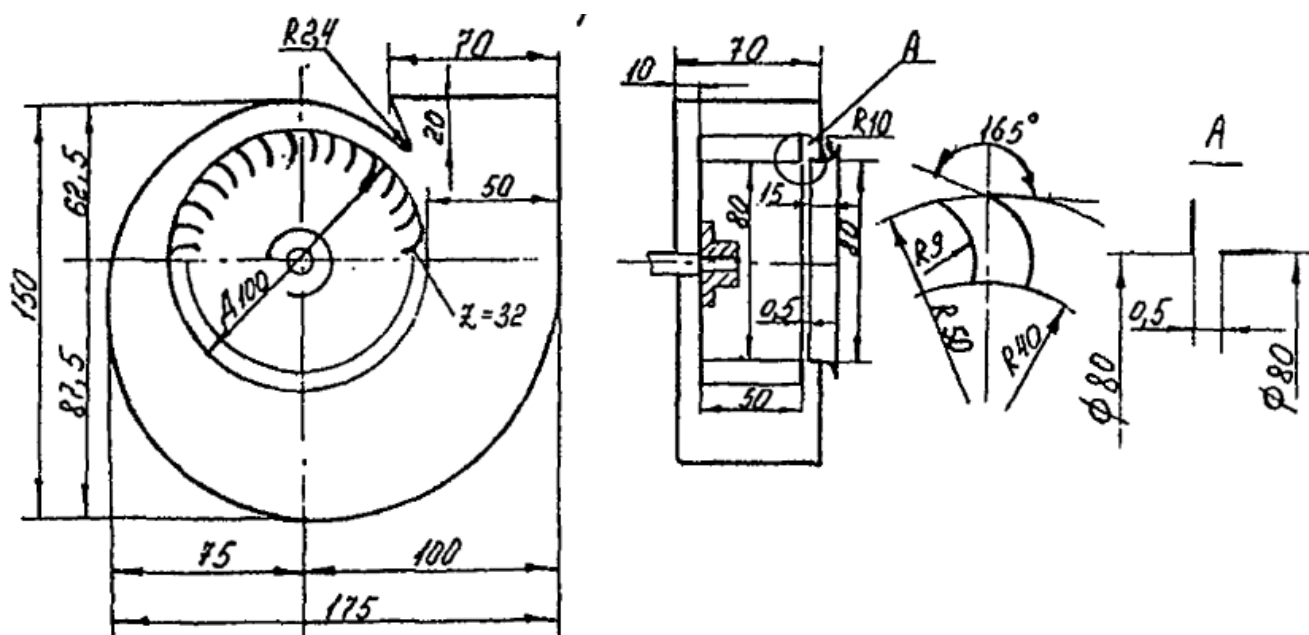


Рис 2.2 – Вентилятор В-Ц14-46

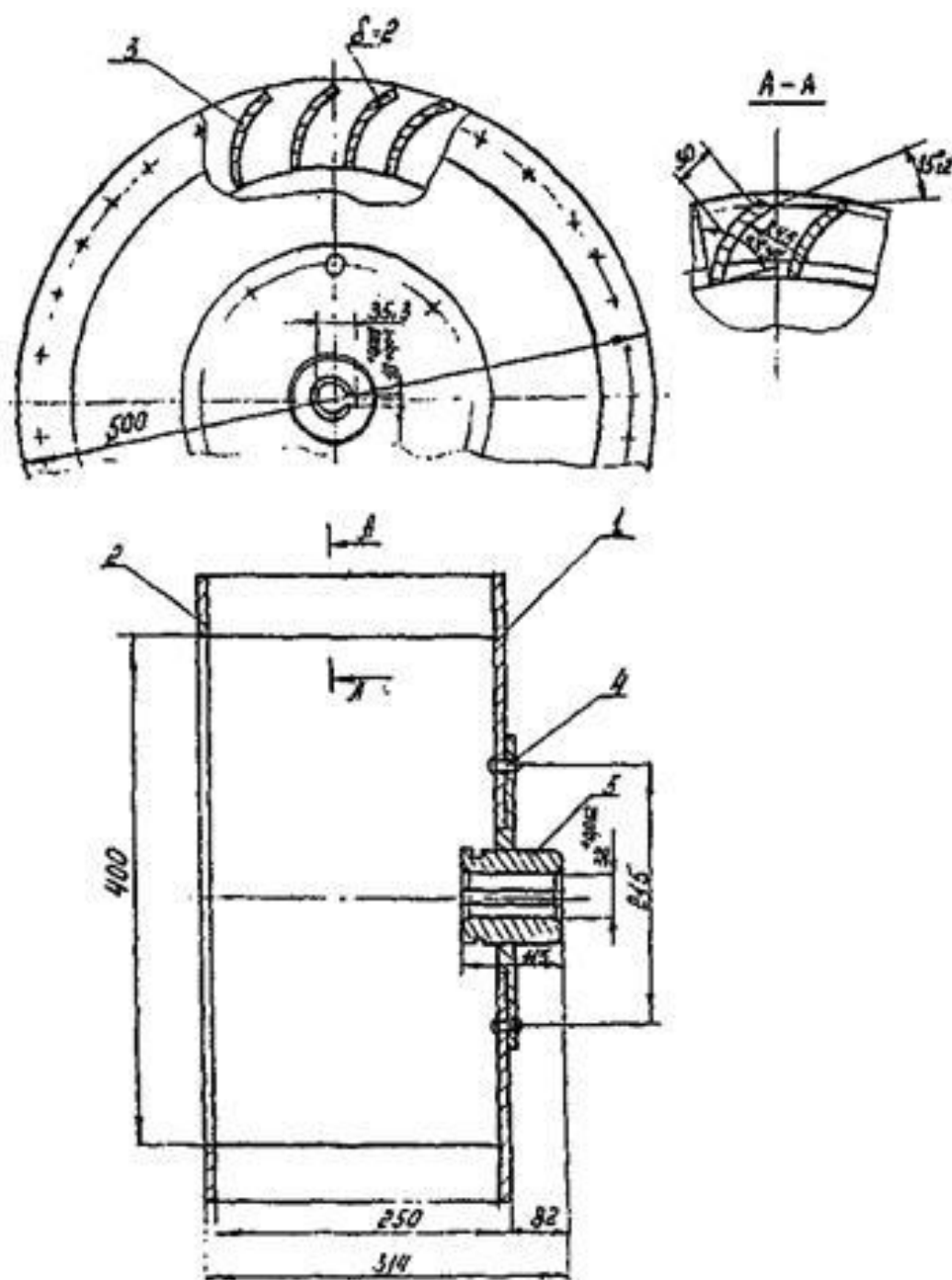


Рис 2.3 – Колесо робоче вентилятору В-Ц14-46

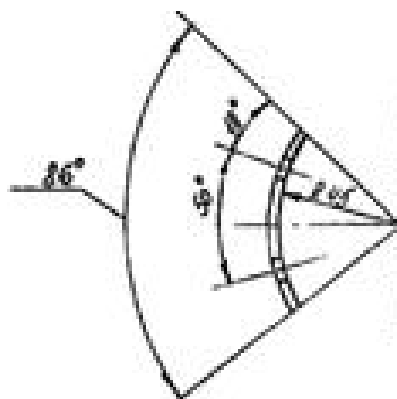


Рис 2.4 - Лопатка

Слід зазначити, що на колесі встановлено 32 лопатки, а кількість обертів колеса 1500 об/хв.

Досліджуються профілі, наведені у табл 2.1. Для цього використовується дані з сайту <https://airfoiltools.com> і для кожного профілю NASA 6412, NASA 63-412, NASA 2412, NASA 4412 знаходиться та записується файл даних точок профілю.

Послідовність створення означених профілів:

1. З сайту <https://airfoiltools.com> зивантажуємо дані про профілі, додаємо третью координату $Z = 0$ і зберігаємо кожен профіль у окремому файлі TXT (див. Додаток А);

2. Оскільки SolidWorks не підтримує безпосереднє побудову кривих по точках в ескізі, використаємо інструмент у контексті Деталі Curve through XYZ Points. Після запуску інструменту вказуємо шлях до TXT файлів з координатами профілів. Так будуть створені усі 4 профілі (рис 2.5).



Рис 2.5 – Створені профілі

3. Після того як були побудовані профілі, потрібно їх збільшити у масштабі і зігнути по радіусу базової лопатки. Базова лопатка (рис 2.7) має довжину 67.69 мм і радіус скруглення 45 мм. Збільшуємо усі профілі до такої довжини та за допомогою інструменту Loft згинаємо з радіусом 45 мм. Результати наведені на рис 2.8.

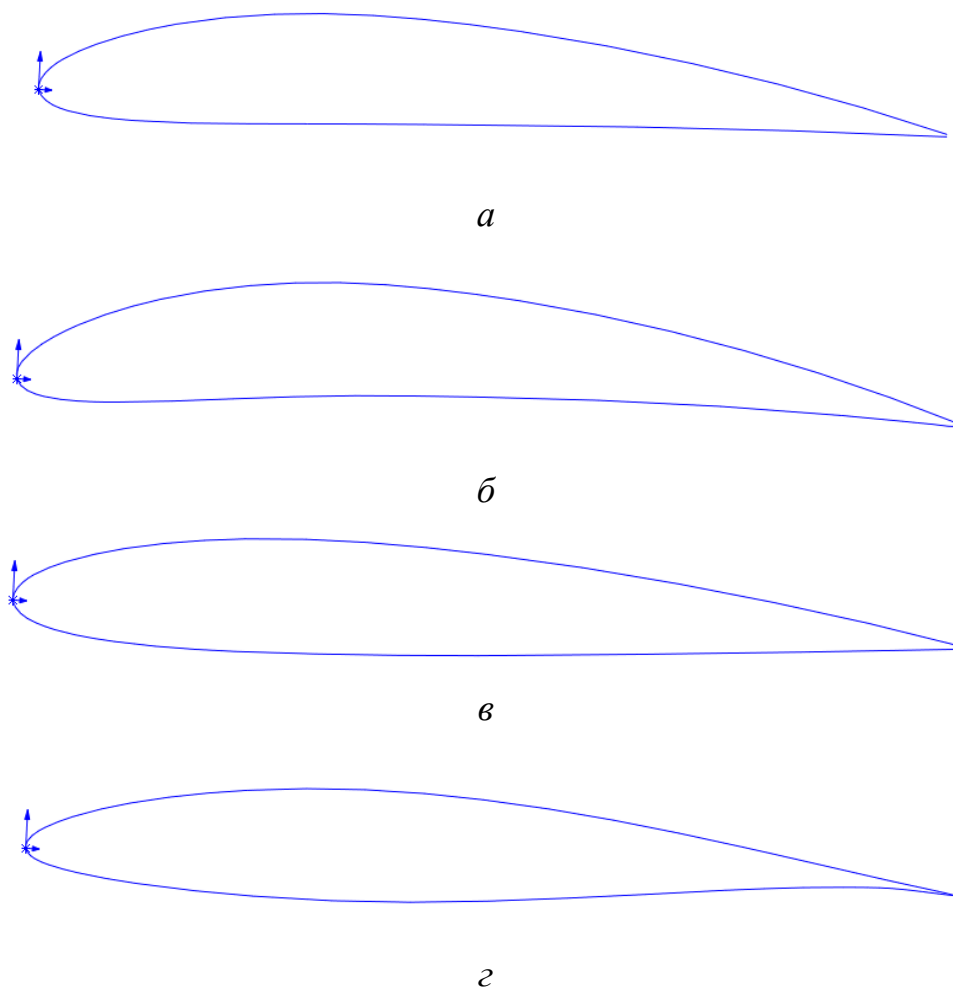


Рис 2.6 – Побудованв профілі: *a* - NACA 4412; *б* - NACA 6412; *в* - NACA 2412; *г* - NACA 63-412

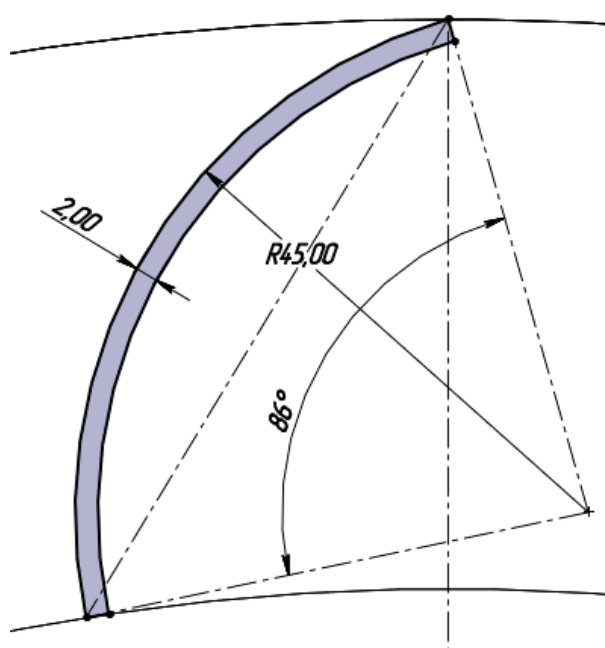


Рис 2.7 – Базова лопатка

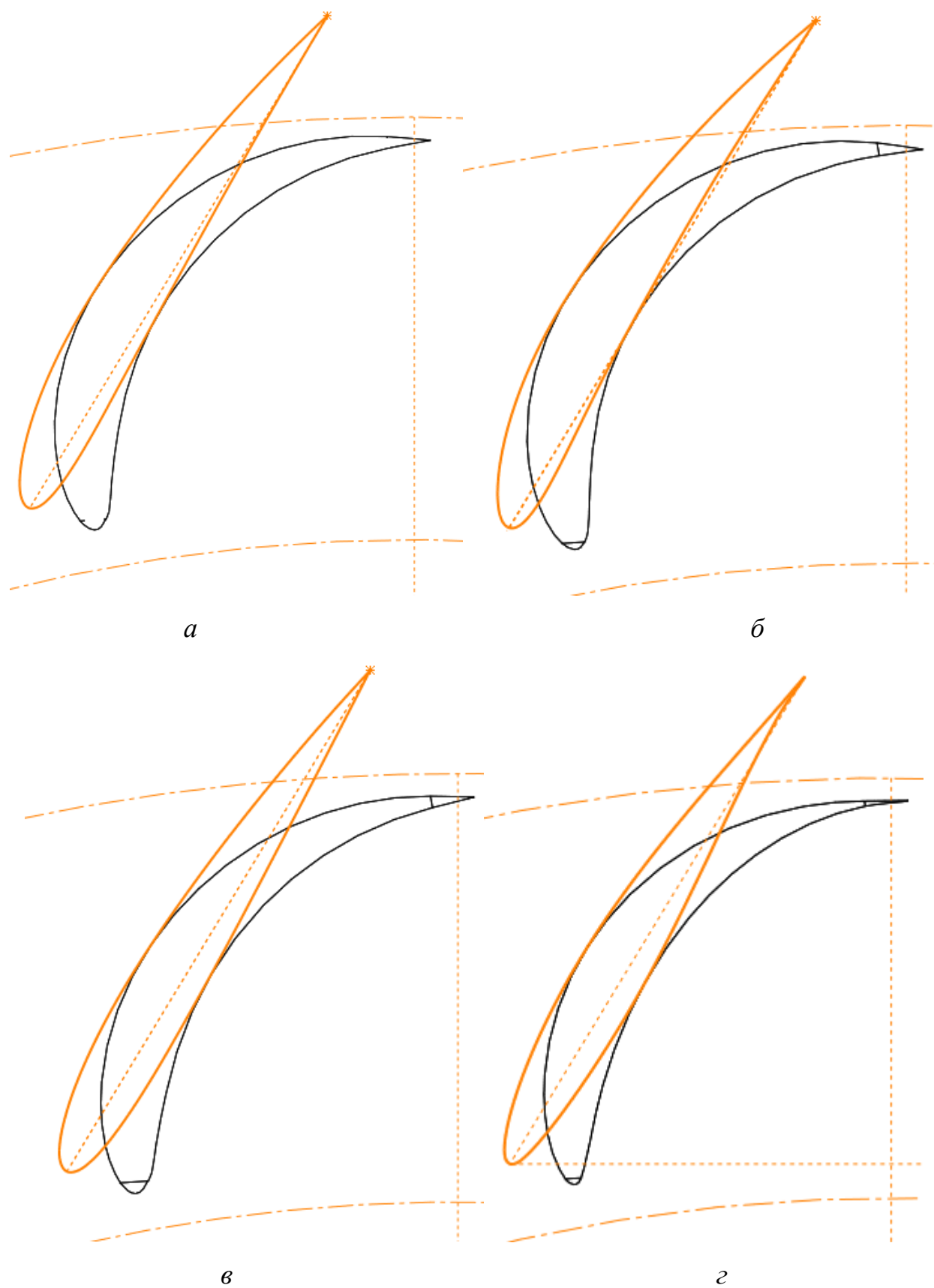


Рис 2.8 – Профілі лопаток після застосування інструменту Loft: *а* - NACA 4412; *б* - NACA 6412; *в* - NACA 2412; *г* - NACA 63-412

Таким чином, після обробки даних про авіаційні профілі було створено 5 коліс на основі рис 2.3: базове а 4 колеса з профільованими лопатками.

4. За кресленням на рис 2.2 будуємо корпус і для проекту FlowSimulation закриваємо вхідний та вихідний отвори кришками. Додатково добудовуємо область обертання.
5. Створюємо новий проект FlowSimulation як внутрішня задача з підзадачею Rotation.
6. У параметрах задаємо на вхідному та вихідному патрібках нейтральний тиск, та задаємо область обертання зі швидкістю 105 рад/с (рис 2.9).
7. Розрахунок проводиться 5 раз для кожного колеса з лопатками. Результати порівнюються.

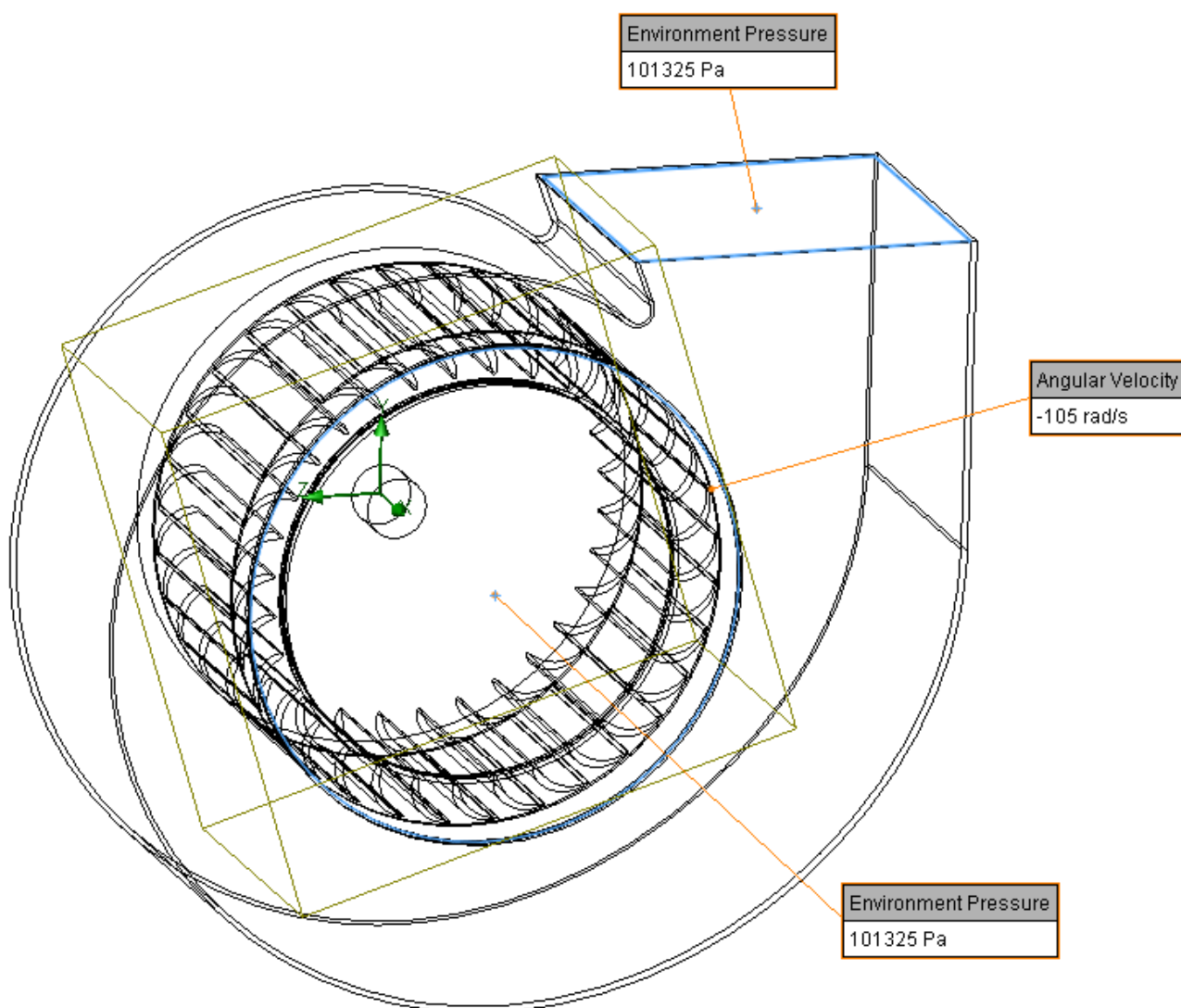


Рис 2.9 – Розрахункова модель

2.5. Методика дослідження впливу геометрії центральної частини робочого колеса вентилятора

Як було зазначено у п. 2.1, однією з вад відцентрових вентиляторів взагалі, та з робочим колесом типу біляча клітка зокрема є нерівномірності потоку на вході в робоче колесо через різкий поворот напрямку потоку, що призводять до зниження продуктивності та збільшення споживання енергії. Таким чином, необхідне поліпшення умов потоку всередині вентилятора типу «біляче колесо».

Метою дослідження є визначення впливу геометрії центральної частини робочого колеса вентилятора задля зниження негативного впливу різкого повороту потоку на вході у вентилятор.

Як вихідні дані виступає геометрія колеса з профільованими лопатями, отримана у попередньому дослідженні (рис 2.10), з якого видно що у середині колеса існує конічна зона зі зниженою швидкістю потоку.

Таким чином у дослідженні планується визначити вплив втулок різної форми у середині колеса на поворот потоку повітря.

Форми втулок, що досліджуються:

- Циліндрична (рис 2.11, а) (висота 0,5 висоти колеса, діаметр 0,5 діаметру отвору колеса);
- Параболічна (рис 2.11, б) (висота - висоти колеса, діаметр - діаметру отвору колеса, прогин – уздовж лінії току як на рис 2.10);
- Конічна (рис 2.11, в) (висота - висоти колеса, діаметр - діаметру отвору колеса).

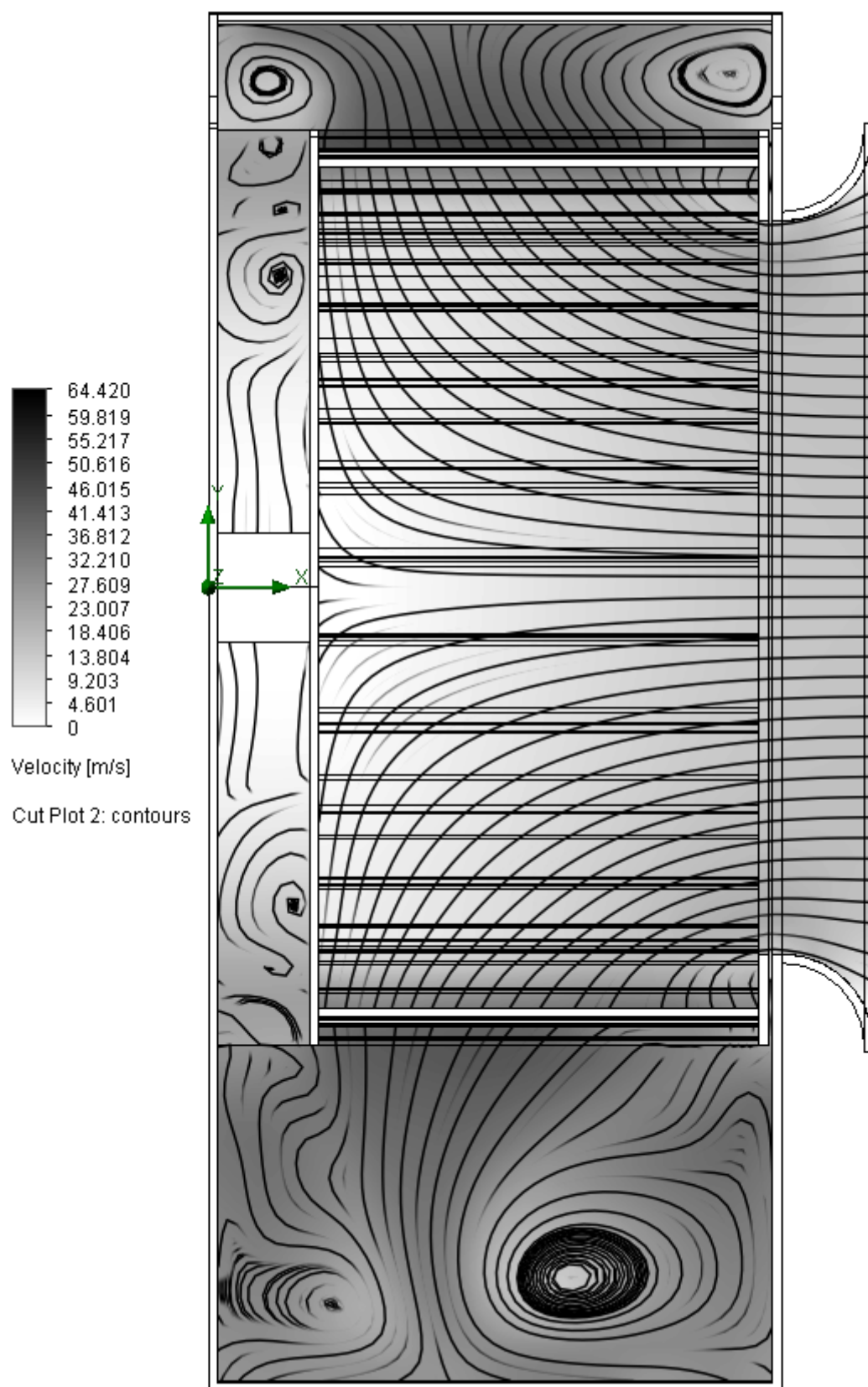


Рис 2.10 – Результати дослідження вертидлятора з профільованими лопатями.
Поперечний перетин

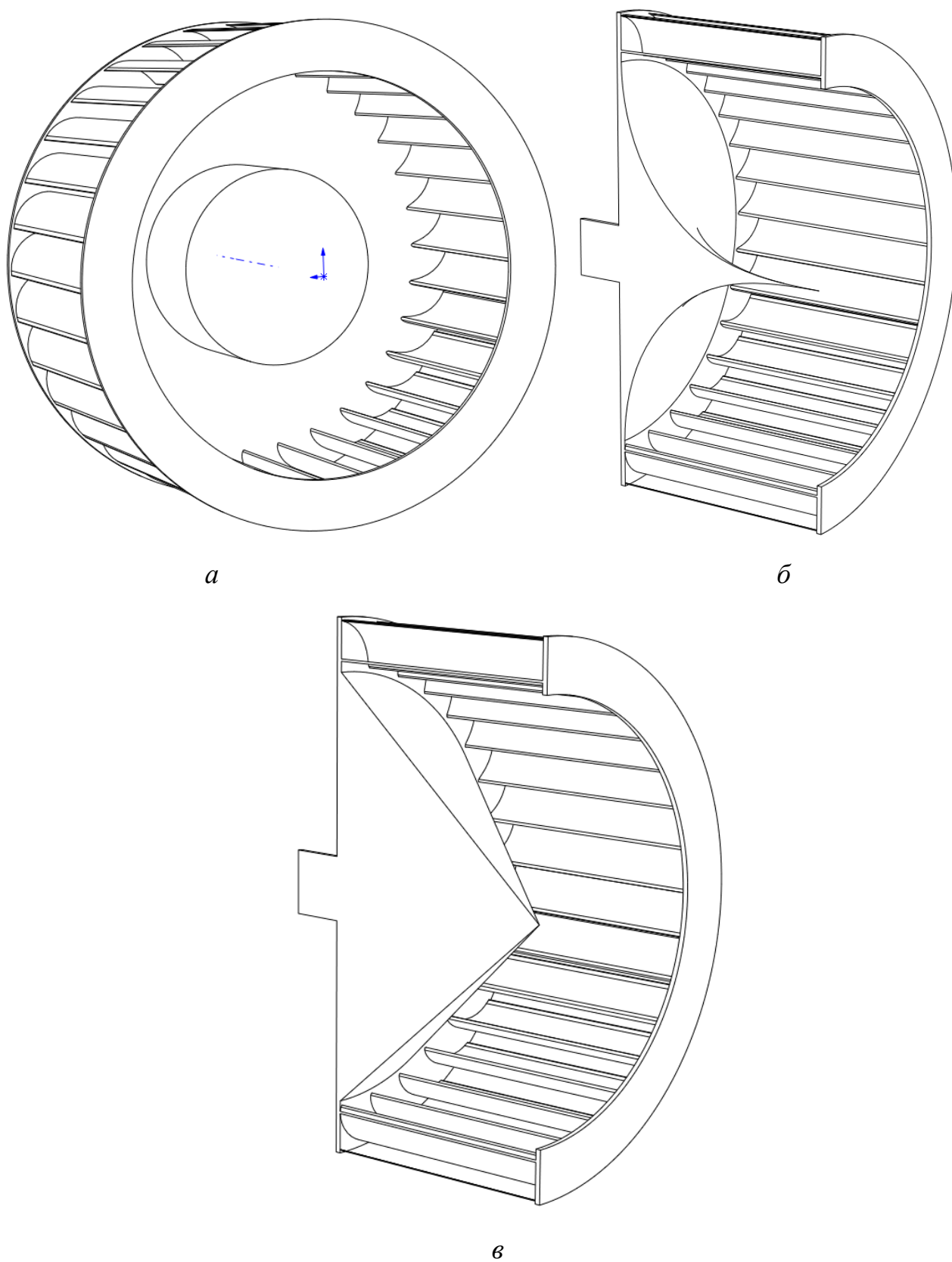


Рис 2.11 – Досліджувані форми втулок у середині коліс вентилятора: *а* – циліндрична, *б* - параболічна, *в* - конічна

Висновки до розділу 2

1. Поведено аналіз літературних джерел і відомих досліджень, який показав, що профілювання лопаток є одним із найбільш дієвих шляхів підвищення ефективності відцентрових вентиляторів типу «біляче колесо». Використання аеродинамічних профілів, зокрема серій НАСА, забезпечує істотні переваги порівняно з традиційними однокриволінійними лопатками.
2. Визначено основні переваги використання аеродинамічних профілів, зокрема серій НАСА: підвищення ефективності та загального тиску; зниження енергоспоживання; поліпшення характеристик потоку; зменшення шуму ;
3. Проведено аналіз аеродинамічних профілів серій НАСА. Ключовим критерієм вибору аеродинамічного профілю лопатки для відцентрових вентиляторів є аеродинамічна якість (Cl/Cd). Це відношення підйомної сили до лобового опору визначає ефективність перетворення енергії та безпосередньо впливає на ККД вентилятора. У результаті аналізу встановлено, що найбільш придатними для використання в радіальних вентиляторах вважаються профілі серії НАСА 4- і 5-значних, зокрема: НАСА 64-012, НАСА 65-012, НАСА 6412, НАСА 63-412.
4. Розроблено методику комп'ютерного моделювання робочого колеса вентилятора з профільованими лопатками на прикладі вентилятора В-Ц14-46-5 дозволило встановити низку важливих закономірностей. Отримані результати підтвердили, що використання аеродинамічних профілів серії НАСА замість традиційних однокриволінійних форм істотно впливає на характеристики потоку в робочому колесі.
5. Розроблено методику дослідження впливу геометрії центральної частини робочого колеса вентилятора задля визначення впливу форми втулки на структуру потоку на вході та всередині колеса

3. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ КОЛІС ВЕНТИЛЯТОРІВ

3.1. Результати дослідження робочих коліс вентиляторів з профільованими лопатями

Результати дослідження робочих коліс вентиляторів з профільованими лопатями наведені на рис 3.1-3.5 та у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати досліджень

Профіль лопаті	Повний тиск на виході, Па	Середня швидкість на виході, м/с	Продуктивність на виході, м ³ /с
Базова	103472,95	31,979	2,0098
NACA 6412	103492,43	32,275	2,2528
NACA 63-412	103473,44	31,974	2,2689
NACA 2412	103523,17	31,961	2,5976
NACA 4412	103483,14	37,577	2,2301

Аналіз поля течії наступних профілів лопаток – базової напівкруглої, NACA 4412, NACA 6412, NACA 2412 та NACA 63-412 – з використанням теорії відношення підйомної сили до опору показав, що профіль NACA 2412 продемонстрував найкращі результати за енергетичною ефективністю вентилятора. Незважаючи на те, що середня швидкість потоку повітря при цьому профілі не була максимальною, саме він забезпечив найвищу стабільність роботи та кращий баланс між тиском і споживанням потужності. Слід зазначити, базовим параметром для вентилятора є продуктивність на виході. Отже, профілем лопатки, що надає максимальну продуктивність є профіль NACA 2412. Моделювання підтвердило наявність позитивної кореляції між відношенням підйомної сили до опору та ефективністю роботи вентилятора за певних режимів. При цьому вплив на повний тиск виявився відносно незначним.

Отримані результати доводять, що застосування оптимізованих профілів NACA, зокрема NACA 2412, дозволяє зменшити споживання енергії та досягти мети енергозбереження.

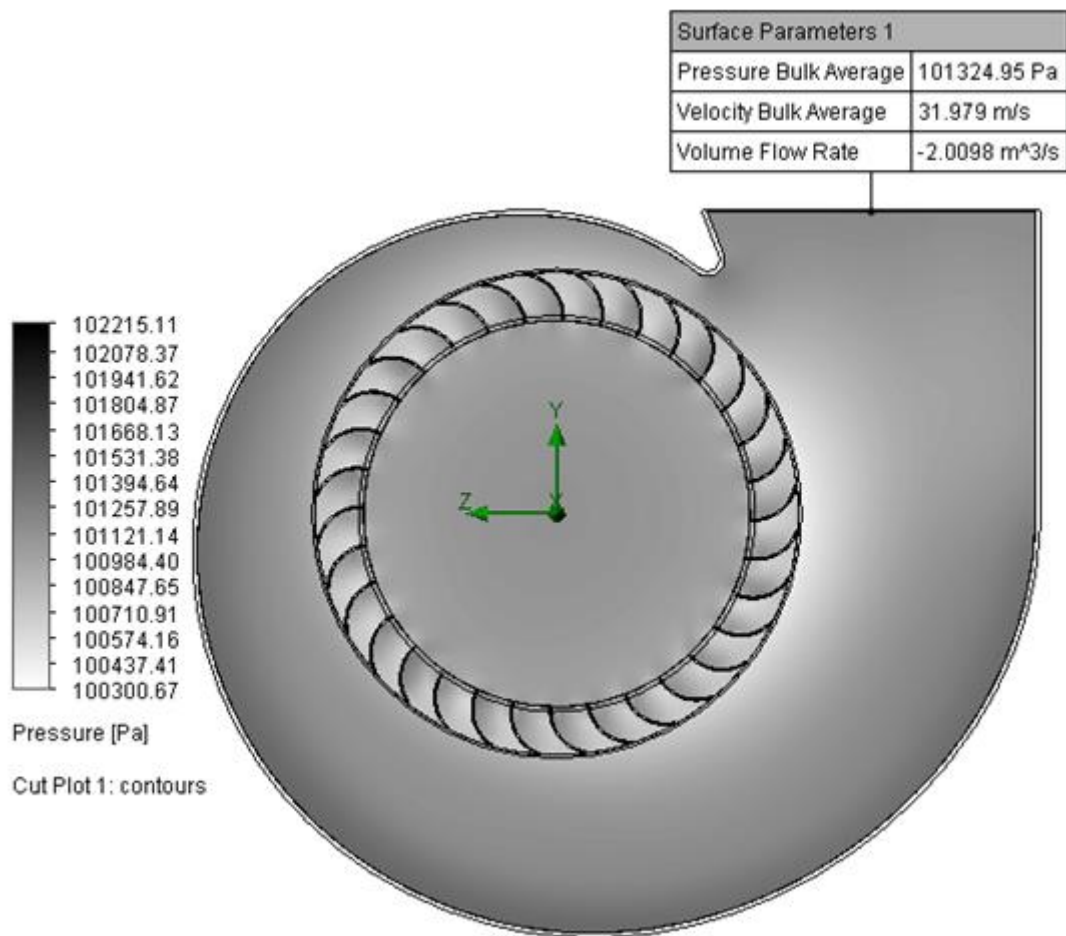
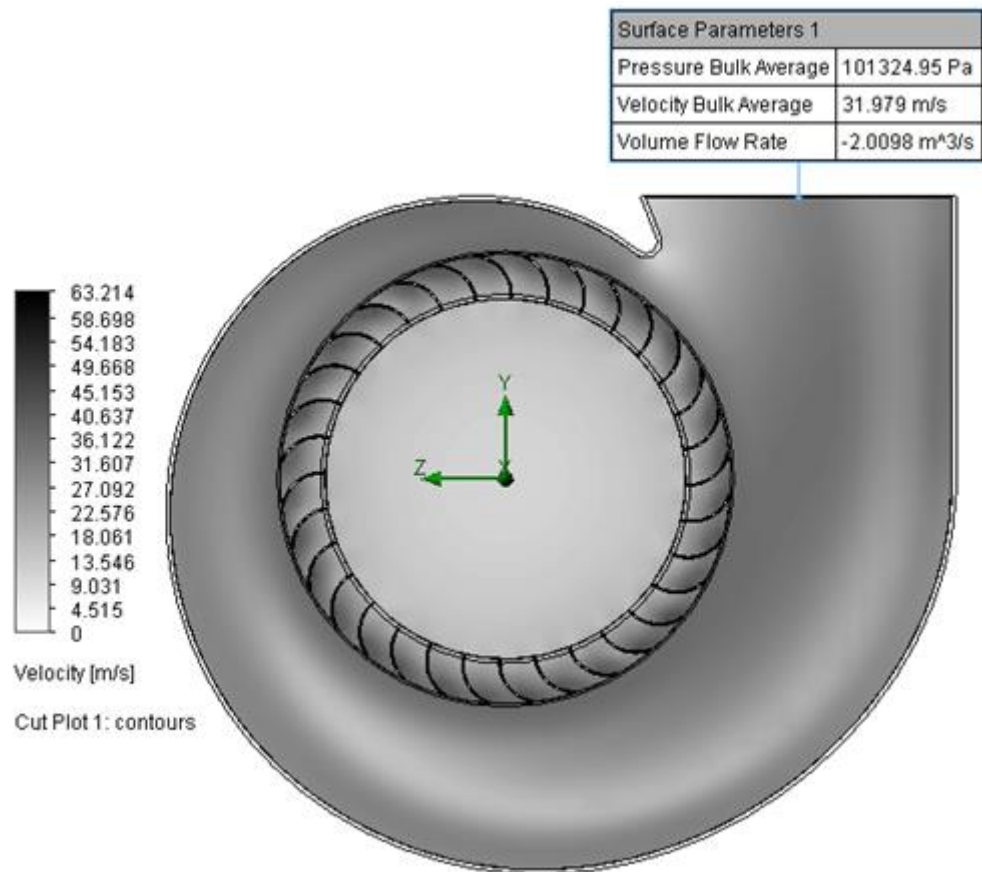


Рис 3.1 – Вентилятор з колесом з базовими лопатями.

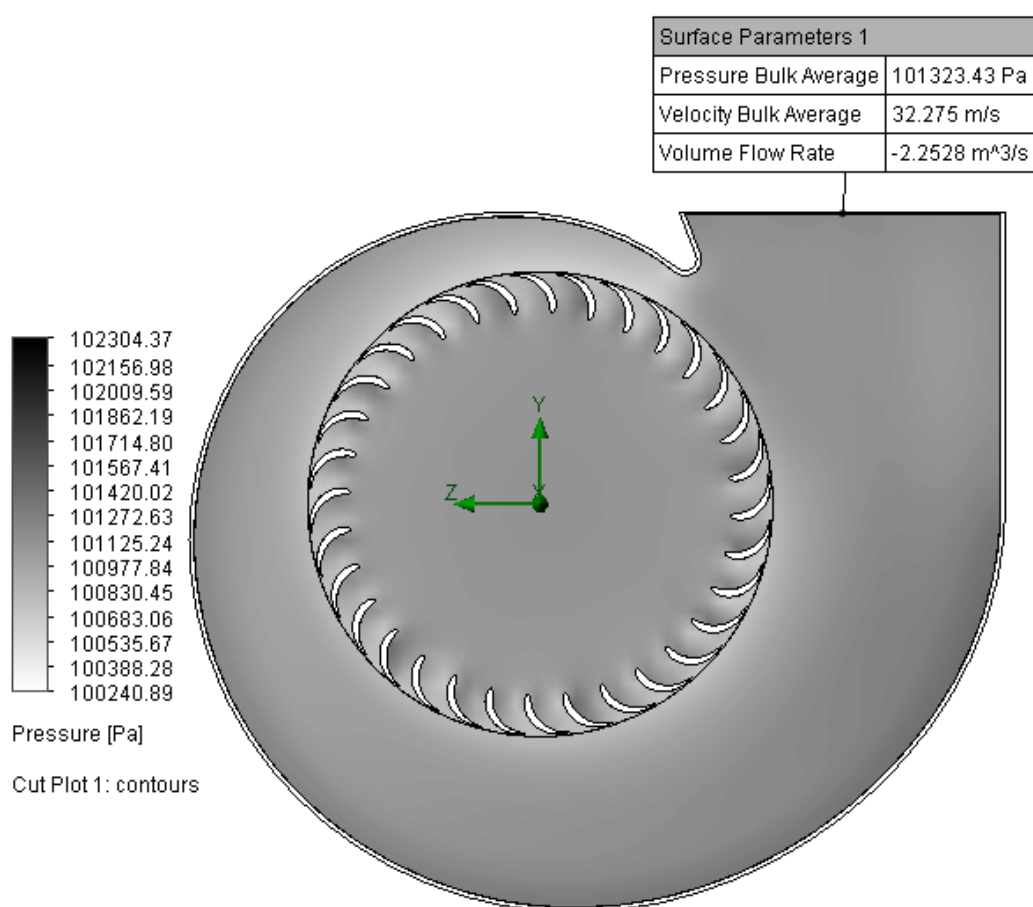
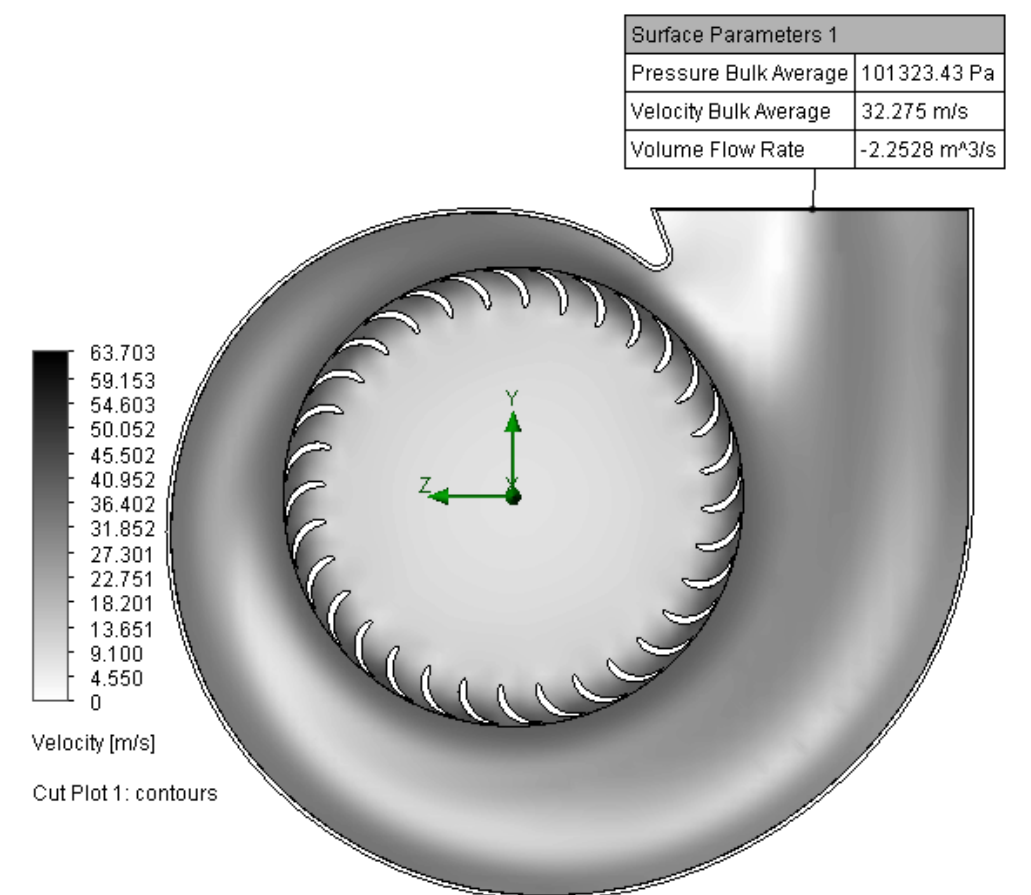


Рис 3.2 – Вентилятор з колесом з лопатями профіля NACA 6412

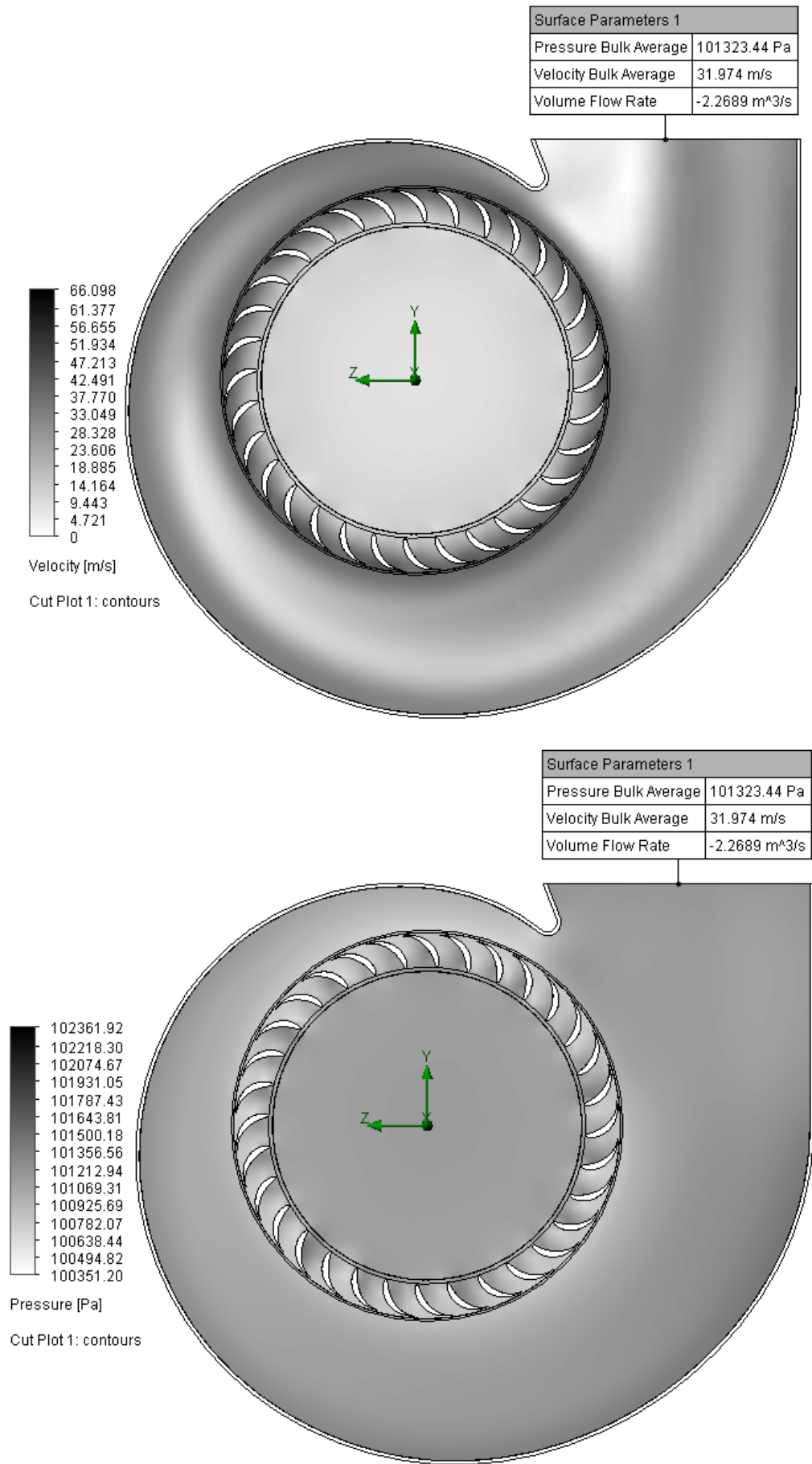


Рис 3.3 – Вентилятор з колесом з лопатями профіля NACA 63-412

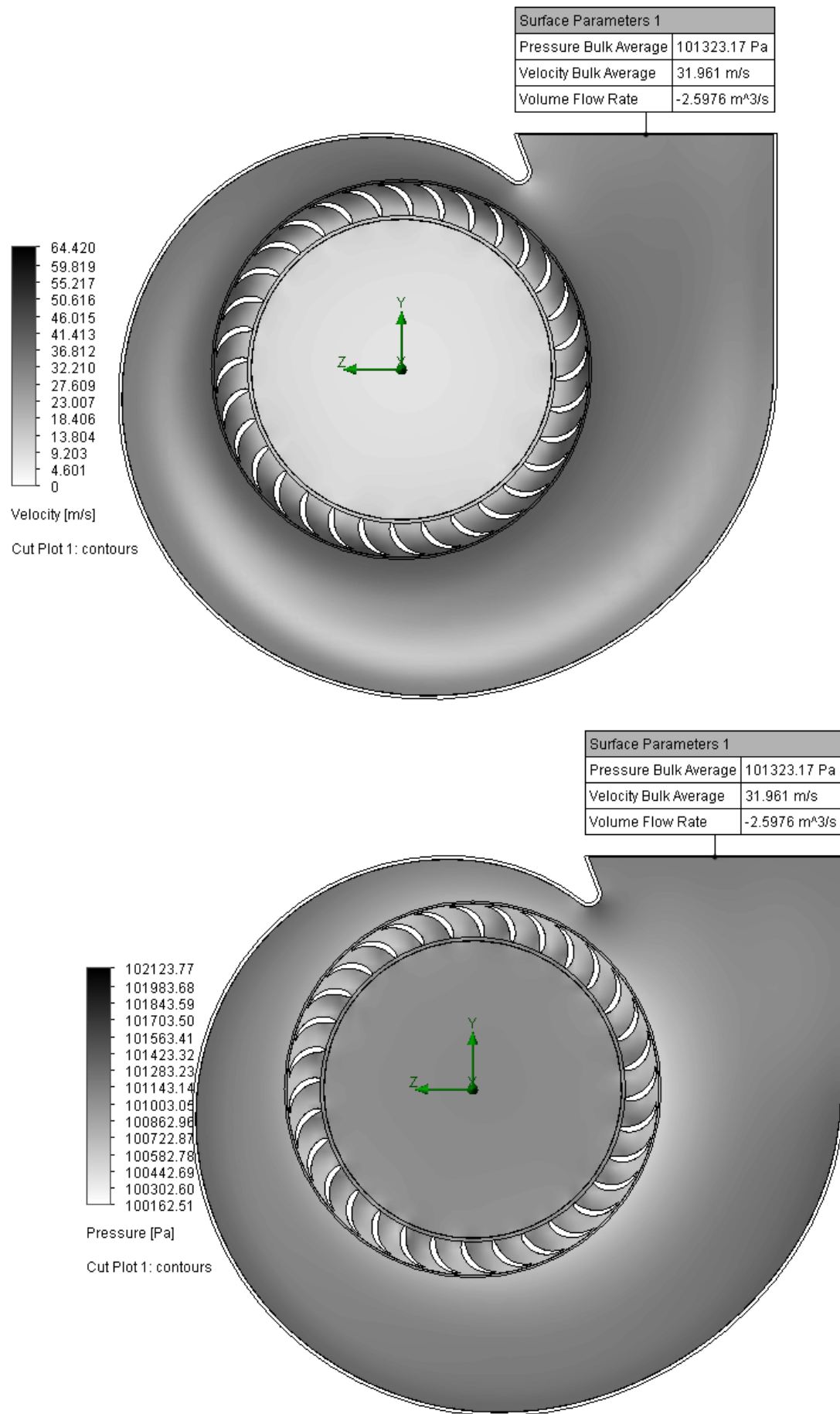


Рис 3.4 – Вентилятор з колесом з лопатями профіля NACA 2412

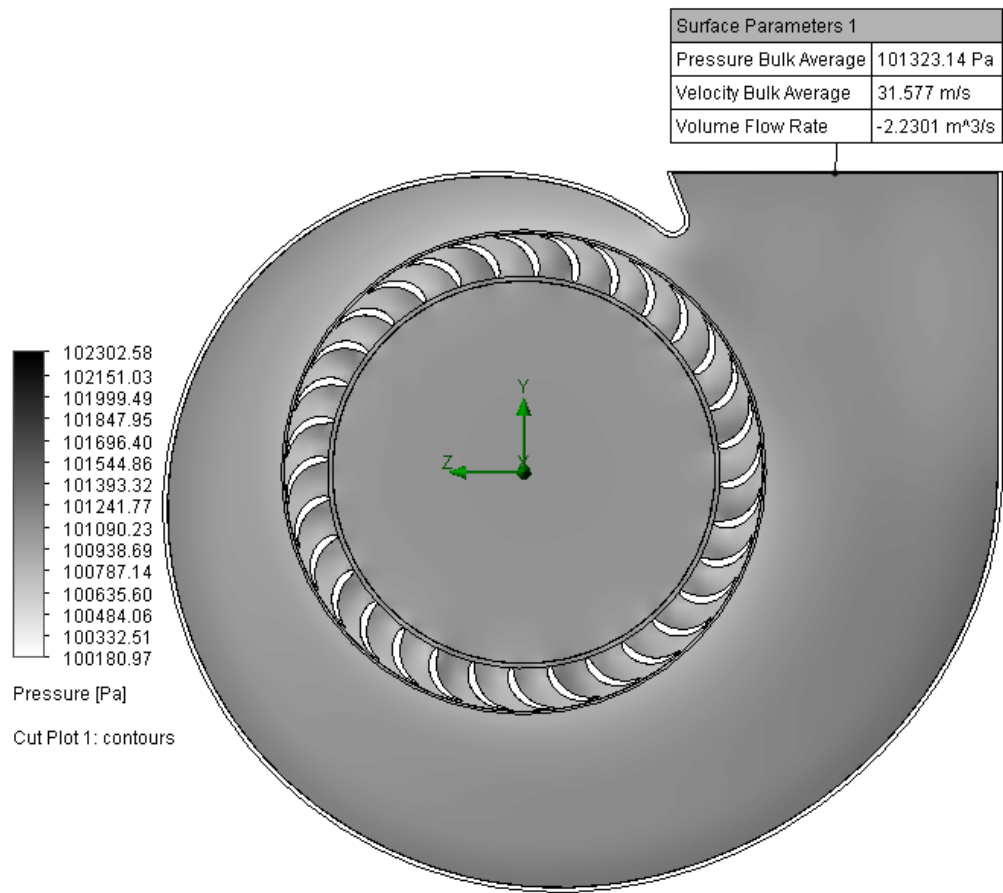
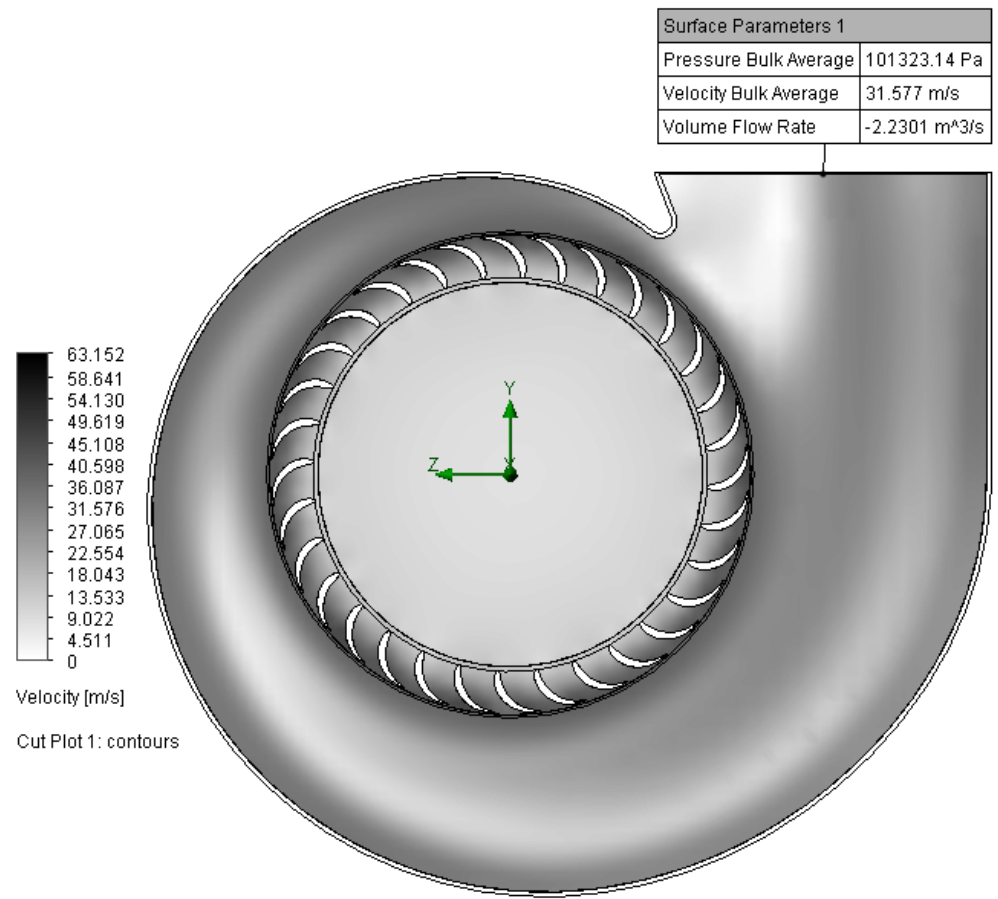


Рис 3.5 – Вентилятор з колесом з лопатями профіля NACA 4412

3.2. Дослідження дослідження центральної частини робочого колеса вентилятора

Результати дослідження впливу форми центральної частини робочого колеса на продуктивність вентилятора наведені на рис 3.6-3.8 та у табл 3.2. На рис 3.6-3.8 показані 2D-конттури середньої величини швидкості (м/с) ті лінії течії у площині, що розташована посередині висоти вентилятора типу «біляче колесо».

Таблиця 3.2 – Результати досліджень

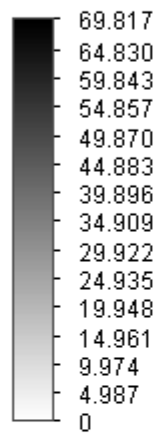
Середина колеса	Середня швидкість на виході, м/с	Продуктивність на виході, м ³ /с
базова	31,961	2,5976
Циліндр	30,779	2,7112
Парабола	33,528	2,6766
Конус	33,674	2,7317

Перший загальний висновок, який можна зробити це те, що у бідь якому розглянутому випадку застосування втулок у колесі продуктивність вентилятора збільшується на 3-5 %, що говорить про вірність спрямування удосконалення.

При використанні циліндричної втулки, як видно з рис 3.6, по її периметру утворюється зона турбулентності тороїдальної форми, що дещо знижує продуктивність і суттєво знижує середню вихідну швидкість.

Характер течії повітря у колесах з параболічною та циліндричною втулками (рис 3.7, 3.8) аналогічний – згладжені лінії течії без завихорень. Це призводить до зростання середньої швидкості повітря на виході на 4,6 – 5 %. Причому конічна форма втулки більш ефективна, ніж параболічна, оскільки забезпечує більшу продуктивність.

Surface Parameters 1	
Pressure Bulk Average	101324.97 Pa
Velocity Bulk Average	30.779 m/s
Volume Flow Rate	-2.7112 m ³ /s



Velocity [m/s]

Cut Plot 2: contours

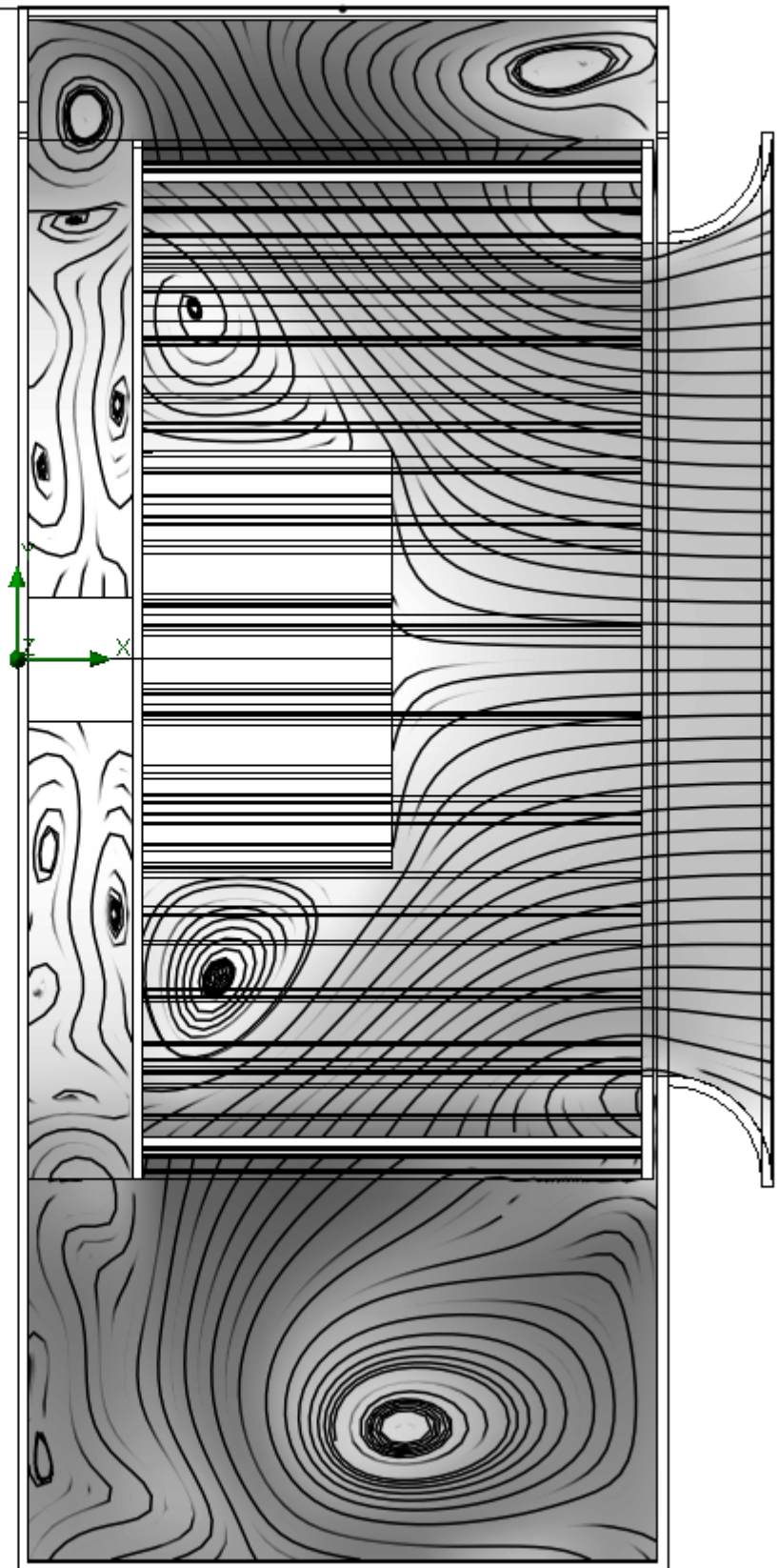
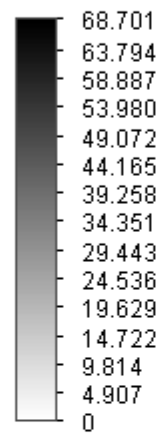


Рис 3.6 – Колесо з циліндричною втулкою

Surface Parameters 1	
Pressure Bulk Average	101323.31 Pa
Velocity Bulk Average	33.528 m/s
Volume Flow Rate	-2.6766 m ³ /s



Velocity [m/s]

Cut Plot 2: contours

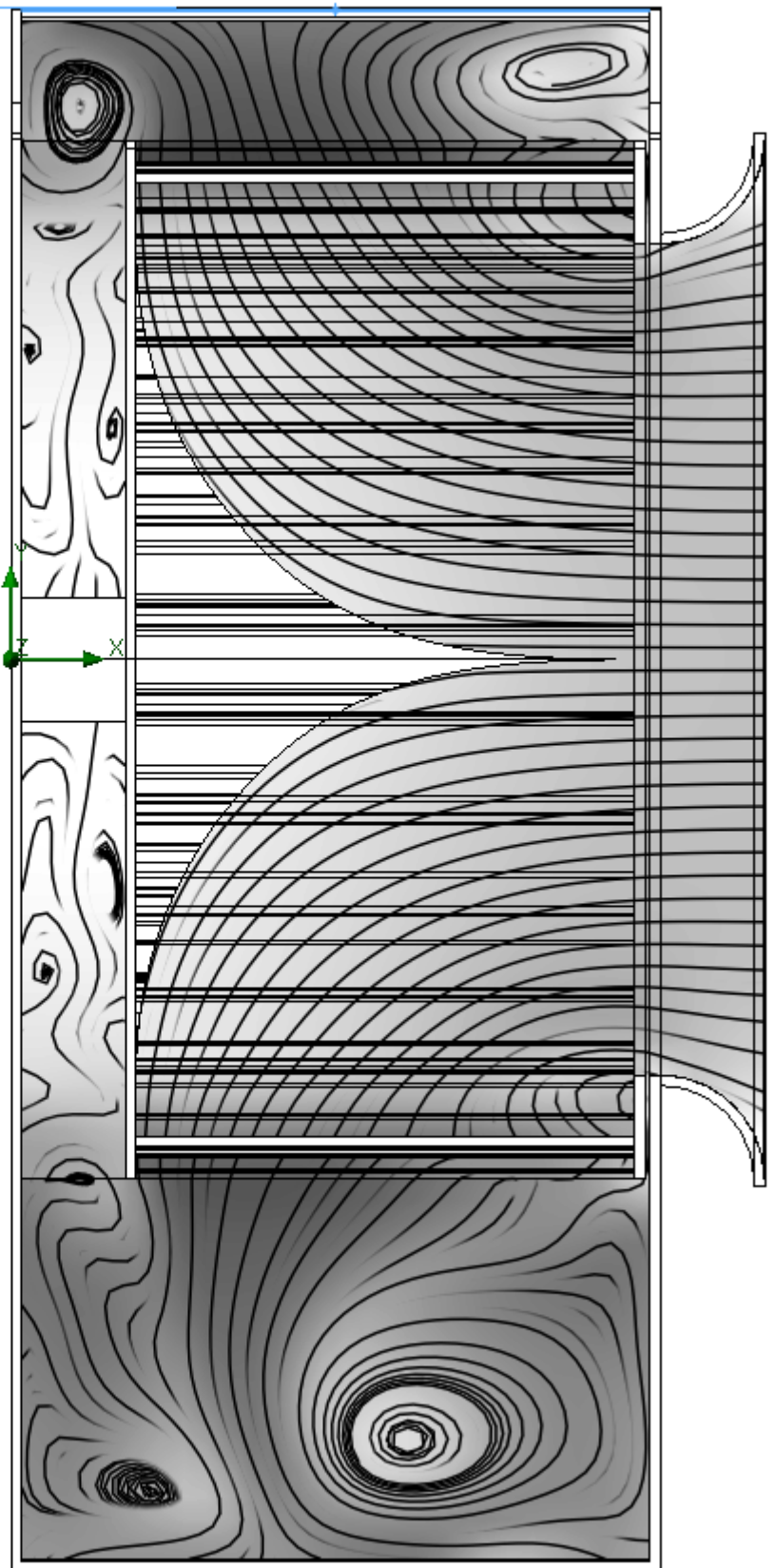


Рис 3.7 – Колесо з параболічною втулкою

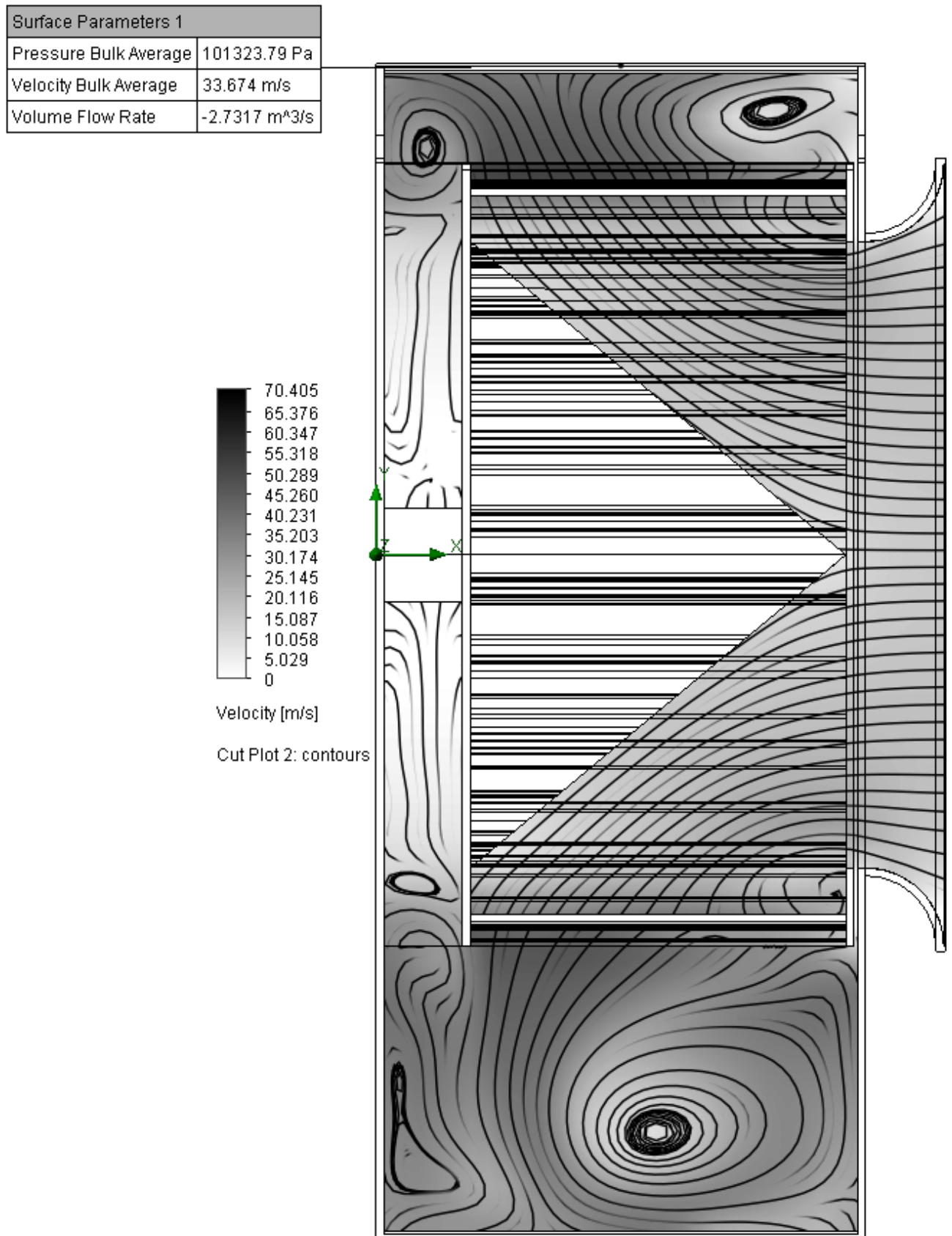


Рис 3.8 – Колесо з конічною втулкою

3.3. Аналіз методів серійного виготовлення профільованих лопатей робочих коліс відцентрових вентиляторів

Розглянемо консолідований практичний огляд основних технологій серійного виготовлення профільованих лопатей з оцінкою придатності, переваг/недоліків, типових матеріалів, діапазонів серійності і ключових вимог (дочірна обробка, контроль якості, балансування тощо).

Критерії вибору методу:

- матеріал (сталь, алюміній, нержавійка, пластик, композити);
- геометрична складність профілю НАСА (товщина, крутіння, хвостова частина);
- точність і шорсткість поверхні;
- вимоги до жорсткості/втомної міцності;
- маса лопаті (впливає на баланс колеса);
- обсяг виробництва (шт/рік);
- вартість оснастки і вартість одиниці (CAPEX vs OPEX);
- вимоги до логістики та часу поставки.

Огляд технологій (з оцінками).

1. Штампування / прогресивні штампи (sheet metal forming)

- матеріали: тонколистова сталь, алюміній, нержавійка;
- переваги: дуже висока продуктивність (тисячі/день), відносно низька вартість одиниці при великих серіях; хороша повторюваність;
- недоліки: значні витрати на оснастку; обмеження по товщині; складні 3D-кривини (повороти крутіння) можуть вимагати багатоетапного формоутворення або добірки через зварювання/склеювання;
- серійність: висока ($\geq 10^4$ шт/рік) — економічно виправдано;
- післяобробка: вирубка, підгин, правка, термообробка, балансування, покриття.

2. Глибоке витягання / гідроформування

- матеріали: алюміній, сталь;

- переваги: краща здатність формувати складні тривимірні форми, тонші стінки без швів;
- недоліки: дорожче за просте штампування; оснастка і налаштування складні;
- серійність: середня — висока.

3. Лиття (під тиском / die casting, формування в постійні форми)

- матеріали: алюмінієві сплави, магнієві сплави, деякі сталі через інвестиційне лиття;
- переваги: добрий ступінь свободи форми (складні перетини), низька вартість одиниці для середніх/великих серій, можливість складних внутрішніх порожнин (легкість);
- недоліки: литі структури мають пори — можуть потребувати обробки/ущільнення; обмеження по механічним властивостям порівняно з кованими/швидко-обробленими деталями;
- серійність: середня — висока.

4. Фрезерна обробка (CNC) з монолітного брикету

- матеріали: сталь, алюміній, високолеговані сплави;
- переваги: висока точність профілю й кромки, відмінні допуски та баланс; підходить для складних НАСА;
- недоліки: дорога одиниця (матеріал + час різання) — економічно виправдано для малих серій або прототипів; багато відходів;
- серійність: мала — середня.

5. Зварні/складальні лопаті (лист + ребро)

- матеріали: лист + ребро з профілю;
- переваги: дозволяє складні форми з меншими затратами оснастки; гнучкість дизайну;
- недоліки: наявність швів, можлива високочастотна нерівномірність маси, потреба додаткового балансування;
- серійність: середня.

6. Компанентні композити (RTM, вакуумна інфузія, прес-формування)

- матеріали: склопластик, вуглепластик (для легких і шумопоглинаючих рішень);
- переваги: мала вага, можливість оптимізації аеродинаміки і демпфування шуму; хороша поверхня;
- недоліки: дорожня оснастка, контролю якості ламінату; питання пожежобезпеки в промислових вентиляторах;
- серійність: мала — середня.

7. 3D-друк (металевий або полімерний)

- переваги: повна свобода форми, малий час на зміну конструкції, відмінно для прототипів та малої серії;
- недоліки: висока вартість одиниці (особливо метал), обмеження по поверхневому стану/мікроструктурі, потреба післяобробки;
- серійність: мала.

На основі аналізу наведених методів можна запропонувати наступні рекомендації по вибору за обсягом виробництва:

- малі серії / прототипи (до ~500 шт/рік): CNC фрезер/3D-друк/композитні прес-форми. Перевага — швидка ітерація дизайну, висока точність.
- середні серії (500–10 000 шт/рік): лиття (алюміній — під тиском або інвестиційне), глибоке витягання, комбіновані з обробкою. Для легких вентиляторів — RTM-композити.
- великі серії (>10 000 шт/рік): прогресивні штампи / прес-формування (якщо матеріал — лист), die-casting для алюмінію. Тут окупається CAPEX на оснастку.

Під час виготовлення колеса рекомендуються наступні методи контролю якості та контроль:

1. Контроль форми профілю — 3D-сканування / координатна вимірвальна машина (СММ) або оптичні профілометри.

2. Балансування робочого колеса — динамічне балансування з допуском згідно стандартів (наприклад, ISO 1940/1 для роторів) — важливо для вібрацій.
 3. Недеформаційна перевірка матеріалу — твердість, мікроструктура (для лиття, зварювання).
 4. Поверхнева обробка — для зменшення шуму і підвищення аеродинаміки: шліфування, полірування, покриття (антикорозійне, антифрикційне).
 5. Тест на міцність/втомну довговічність — для критичних застосувань.
- Порівняємо розглянуті методи (табл 3.3).

Таблиця 3.3 - Порівняльна таблиця методів серійного виготовлення лопатей

Метод	Матеріал	Оснастка (тис. \$)	500 шт (за 1 шт, \$)	5000 шт (за 1 шт, \$)	50 000 шт (за 1 шт, \$)	Придатність
CNC фрезерування	Алюміній, сталь	5–10	150– 250	120– 180	100–140	Мала серія, прототипи
3D-друк метал	Нерж. сталь, Al	2–5	200– 400	150– 250	120–180	Мала серія, R&D
Штампування (прогресивні штампи)	Сталь листова, Al	80–150	—	20–40	3–8	Велика серія
Гідроформування / глибоке вигинання	Al, сталь тонколист	40–70	80–120	30–50	10–20	Середня/велика серія
Лиття під тиском (die casting)	Al сплави	100–200	—	25–45	5–10	Велика серія
Інвестиційне лиття	Сталь, жароміцні	30–50	120– 180	50–80	15–25	Середня серія
Зварна конструкція (лист + ребро)	Сталь, нерж.	10–20	80–120	40–60	20–30	Середня серія
Композити (RTM, інфузія)	Склопластик, CFRP	30–60	100– 150	50–70	15–25	Мала/середня серія

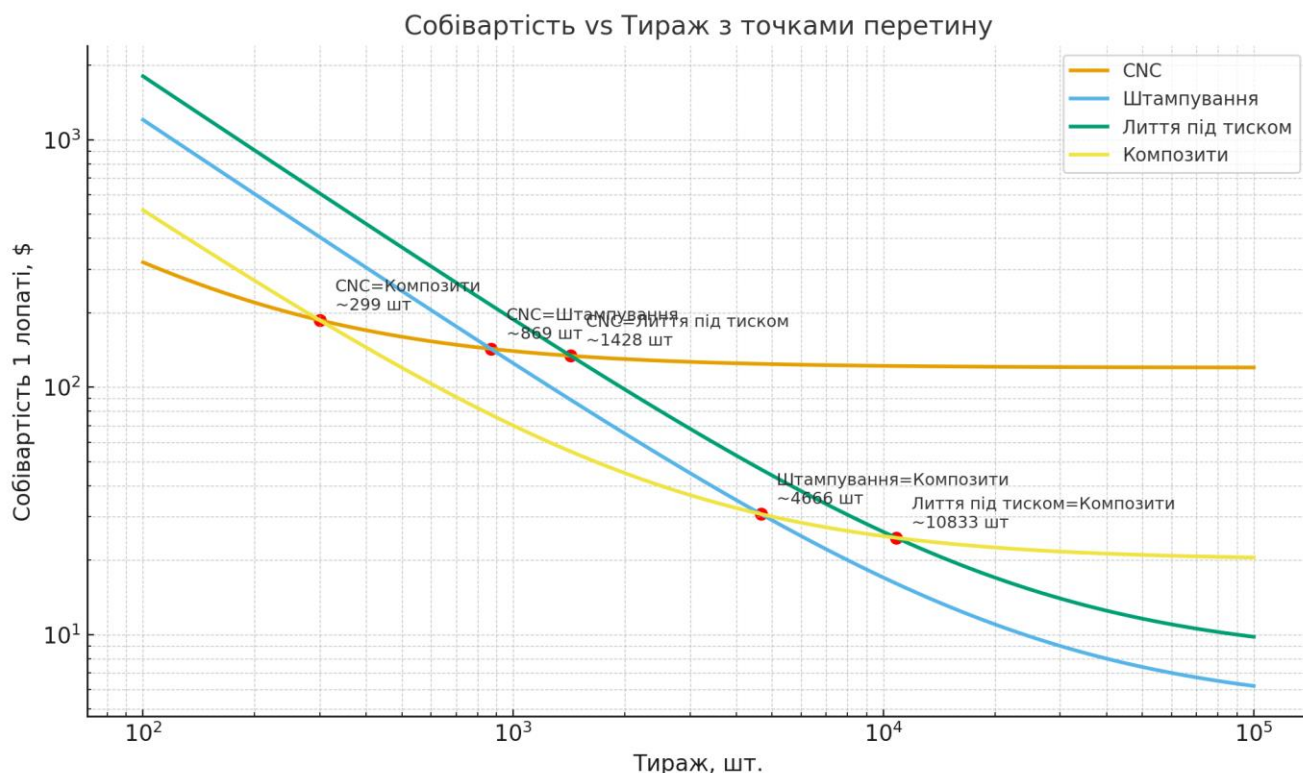


Рис 3.9 – Порівняння технологій виготовлення залежно від собівартості, серії та технології

Основні результати (округлені значення), згідно з рис 3.9)

1. CNC = Композити - при ~300 шт, собівартість ~187 \$/шт. Для менших тиражів вигідніше CNC (немає складної оснастки), далі — композити;
2. CNC = Штампування - при ~870 шт, собівартість ~143 \$/шт. До 800–900 шт економічніше CNC, після — краще переходити на штампування.
3. CNC = Лиття під тиском - при ~1430 шт, собівартість ~134 \$/шт. Подібна ситуація: CNC добре тільки для малої серії, далі — лиття виграє.
4. Штампування = Композити - при ~4700 шт, собівартість ~31 \$/шт. При середніх тиражах (1–5 тис.) композити ще конкурують, але після 5 тис. значно дешевше йти в штампування.
5. Лиття під тиском = Композити - при ~10 800 шт, собівартість ~25 \$/шт. Композити програють після переходу в справжню «велику серію».

Остаточні висновки з аналізу:

- До 300 шт: вигідніше CNC → швидко, без великих інвестицій.

- 300–1000 шт: можна розглядати композити, якщо важлива маса та аеродинаміка.
- 1000–5000 шт: перехід на лиття під тиском або штампування вже економічно доцільний.
- >5000 шт: штампування або лиття під тиском стають беззаперечними лідерами за собівартістю.

Висновки до розділу 3

1. Дослідження профілів лопатей показало, що перед аналізованих профілів НАСА показав, найкращим за поєднанням енергоефективності, стабільності потоку та продуктивності є профіль НАСА 2412, який забезпечив найбільшу витрату повітря при достатньо високому значенні повного тиску. Виявлено позитивну кореляцію між відношенням підйомної сили до опору (Cl/Cd) та ефективністю вентилятора. Це підтверджує доцільність застосування профільованих лопатей замість базових напівкруглих.
2. Встановлено, що нерівномірність розподілу швидкостей у зоні центрального осердя є однією з основних причин втрат енергії та зниження продуктивності вентиляторів типу «біляче колесо».
3. У результаті дослідження впливу центральної частини робочого колеса на потік повітря встановлено, що в усіх випадках використання вставок підвищує продуктивність вентилятора на 3–5 %. Найбільш ефективною виявилася конічна форма втулки, яка забезпечила найбільшу продуктивність і середню швидкість потоку на виході. Параболічна форма також продемонструвала суттєве поліпшення характеристик, тоді як циліндрична втулка виявилась менш ефективною через утворення зон турбулізації.
4. Встановлено, що застосування циліндричної втулки зменшує турбулізацію потоку, однак не усуває повністю застійні зони;
5. Встановлено, що параболічна форма втулки забезпечує найбільш плавний поворот потоку, сприяє зменшенню відривів і формуванню рівномірного розподілу швидкості у міжлопаткових каналах;
6. Встановлено, що конічна втулка характеризується кращим спрямуванням потоку вздовж осі, але може викликати локальне підвищення швидкості й пов'язані з цим втрати.
7. Таким чином, дослідження довели, що поєднання оптимізованих профілів лопатей (зокрема НАСА 2412), правильної форми центральної втулки та

раціонально обраної технології виготовлення дозволяє комплексно підвищити ефективність вентиляторів типу «біляче колесо», знизити енергоспоживання та собівартість у виробництві.

8. У результаті аналізу методи серійного виготовлення профільованих лопатей встановлено, що вибір методу значною мірою залежить від обсягу виробництва, так для малих серій (до 300 шт) економічно вигідні CNC-обробка та 3D-друк; у середніх серіях (300–1000 шт) можуть застосовуватися композити, особливо якщо важлива низька маса та шумопоглинальні властивості; при випуску 1000–5000 шт доцільним є лиття під тиском або глибоке витягіння; у великих серіях (>5000 шт) беззаперечними лідерами за собівартістю залишаються штампування та лиття під тиском.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає у дослідженні процесу роботи відцентрового вентилятора з робочим колесом типу «біляча клітка» та визначення раціональних параметрів лопатей.

1. Поведено аналіз літературних джерел і відомих досліджень, який показав, що профілювання лопаток є одним із найбільш дієвих шляхів підвищення ефективності відцентрових вентиляторів типу «біляче колесо». Використання аеродинамічних профілів, зокрема серій НАСА, забезпечує істотні переваги порівняно з традиційними однокриволінійними лопатками.
2. Визначено основні переваги використання аеродинамічних профілів, зокрема серій НАСА: підвищення ефективності та загального тиску; зниження енергоспоживання; поліпшення характеристик потоку; зменшення шуму ;
3. Проведено аналіз аеродинамічних профілів серій НАСА. Ключовим критерієм вибору аеродинамічного профілю лопатки для відцентрових вентиляторів є аеродинамічна якість (Cl/Cd). Це відношення підйомної сили до лобового опору визначає ефективність перетворення енергії та безпосередньо впливає на ККД вентилятора. У результаті аналізу встановлено, що найбільш придатними для використання в радіальних вентиляторах вважаються профілі серії НАСА 4- і 5-значних, зокрема: НАСА 64-012, НАСА 65-012, НАСА 6412, НАСА 63-412.
4. Дослідження профілів лопатей показало, що перед аналізованих профілів НАСА показав, найкращим за поєднанням енергоефективності, стабільності потоку та продуктивності є профіль НАСА 2412, який забезпечив найбільшу витрату повітря при достатньо високому значенні повного тиску. Виявлено позитивну кореляцію між відношенням підйомної сили до опору (Cl/Cd) та ефективністю вентилятора. Це підтверджує доцільність застосування профільованих лопатей замість базових напівкруглих.

5. Встановлено, що нерівномірність розподілу швидкостей у зоні центрального осердя є однією з основних причин втрат енергії та зниження продуктивності вентиляторів типу «біляче колесо».
6. У результаті дослідження впливу центральної частини робочого колеса на потік повітря встановлено, що в усіх випадках використання вставок підвищує продуктивність вентилятора на 3–5 %. Найбільш ефективною виявилася конічна форма втулки, яка забезпечила найбільшу продуктивність і середню швидкість потоку на виході. Параболічна форма також продемонструвала суттєве поліпшення характеристик, тоді як циліндрична втулка виявилась менш ефективною через утворення зон турбулізації.
7. Встановлено, що застосування циліндричної втулки зменшує турбулізацію потоку, однак не усуває повністю застійні зони;
8. Встановлено, що параболічна форма втулки забезпечує найбільш плавний поворот потоку, сприяє зменшенню відривів і формуванню рівномірного розподілу швидкості у міжлопаткових каналах;
9. Встановлено, що конічна втулка характеризується кращим спрямуванням потоку вздовж осі, але може викликати локальне підвищення швидкості й пов'язані з цим втрати.
10. Таким чином, дослідження довели, що поєднання оптимізованих профілів лопатей (зокрема НАСА 2412), правильної форми центральної втулки та раціонально обраної технології виготовлення дозволяє комплексно підвищити ефективність вентиляторів типу «біляче колесо», знизити енергоспоживання та собівартість у виробництві.
11. У результаті аналізу методи серійного виготовлення профільованих лопатей встановлено, що вибір методу значною мірою залежить від обсягу виробництва, так для малих серій (до 300 шт) економічно вигідні CNC-обробка та 3D-друк; у середніх серіях (300–1000 шт) можуть застосовуватися композити, особливо якщо важлива низька маса та шумопоглинальні властивості; при випуску 1000–5000 шт доцільним є

лиття під тиском або глибоке витяжіння; у великих серіях (>5000 шт) беззаперечними лідерами за собівартістю залишаються штампування та лиття під тиском.