

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ФЕСЕНКО КСЕНІЯ ВОЛОДИМИРІВНА

УДК 621.515.01(043.3)

**МЕТОД РОЗРАХУНКОВО-ТЕОРЕТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
СТРУКТУРИ ТЕЧІЇ ТА ХАРАКТЕРИСТИК
СТУПЕНІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАГНІТАЧІВ**

Спеціальність 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Бойко Людмила Георгіївна,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут", завідувач кафедри теорії авіаційних двигунів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Суботович Валерій Петрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри турбінобудування

кандидат технічних наук, професор
Бондаренко Герман Андрійович,
Сумський державний університет,
професор кафедри технічної теплофізики

Захист відбудеться 29 жовтня 2015 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.11 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий __ вересня 2015 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Ю.О. Юдін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Газоперекачувальні агрегати (ГПА) з відцентровим нагнітачем (ВЦН) поширені на магістральних газопроводах, в підземних сховищах газу і на розподільчих станціях. Крім газотранспортної системи відцентрові компресорні машини широко використовуються в інших галузях промисловості: в енергетиці, металургії, машинобудуванні та ін.

На даний час майже третина ГПА компресорних станцій України виробила свій ресурс або близька до цього і потребує реконструкції шляхом модернізації низько-ефективних відцентрових нагнітачів з метою підвищення їх ККД, збільшення напору, а також розширення зони робочих режимів. Отримання успішних проектних рішень можливо при комплексному застосуванні експериментальних і розрахункових методів, що дають можливість чисельно моделювати течію у ВЦН з високою точністю і надійністю. Використання таких підходів істотно скорочує зусилля і ресурси, що витрачаються на проектування та проведення дорогих експериментальних досліджень.

Беручи до уваги різноманітність та розповсюдженість відцентрових компресорних машин, доцільно при проектуванні мати сучасний метод перевірного розрахунку течії, що дозволяє визначати сумарні характеристики нагнітачів і поля газотермодинамічних параметрів у всій проточній частині, включаючи міжлопаткові канали. Таким чином, удосконалення методів розрахунку двовимірної дозвукової стисливої течії у ступенях відцентрових нагнітачів, які коректно описують геометричну форму лопаткових поверхонь і проточної частини та дозволяють проводити чисельні дослідження в широкому діапазоні режимів роботи, є актуальним завданням, яке визначило напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут" у рамках завдань фундаментальних держбюджетних НДР МОН України «Розробка та удосконалення теоретичних методів газодинамічного розрахунку сучасних авіаційних двигунів і їх конвертація в наземні установки» (ДР № 0103U004108), «Теоретичні основи розробки математичних моделей лопаткових машин сучасних газотурбінних двигунів та газоперекачувальних агрегатів і побудова на їх основі моделей двигунів високого рівня» (ДР № 0106U001048), «Створення математичних моделей високого рівня для дослідження характеристик газотурбінних двигунів та газоперекачувальних агрегатів на стаціонарних режимах» (ДР № 0108U010972) та госпдоговірної НДР «Розробка програмного комплексу для розрахунку газодинамічних характеристик відцентрового компресора за відомою геометрією проточної частини» (ВАТ «Сумське НВО ім. М.В. Фрунзе», м. Суми), в яких здобувач була виконавцем окремих етапів.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є розробка методу розрахунково – теоретичного дослідження структури дозвукової стисливої осьосиметричної течії в ступенях відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс та їх сумарних характеристик для пошуку шляхів удосконалення роботи цих ступенів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні задачі:

– розробити метод розрахунку двовимірної течії в ступенях відцентрових нагнітачів, що дозволяє моделювати дозвуковий потік газу в широкому діапазоні режимів роботи і враховувати геометричні особливості радіальних робочих коліс, лопаткових і безлопаткових дифузорів та проточної частини. В основу методу покласти рішення системи рівнянь руху нев'язкого нетеплопровідного дозвукового стисливого газу та здійснити урахування прояву в'язких властивостей течії на базі узагальнених напівемпіричних залежностей;

– за допомогою створеного програмного комплексу провести верифікацію методу шляхом зіставлення результатів розрахунку з даними експериментальних досліджень;

– провести чисельне дослідження течії в ступенях відцентрових нагнітачів для визначення їх сумарних характеристик і структури течії в широкому діапазоні режимів роботи, виявити вплив змін режиму роботи на особливості течії в нагнітачах;

– на підставі аналізу отриманих результатів запропонувати вдосконалення геометричних параметрів ступенів для підвищення їх напору та ККД на заданих режимах.

Об'єкт дослідження – газодинамічні процеси у ступені відцентрового нагнітача з радіальними лопатками робочого колеса, що утворені циліндричними або конічними поверхнями та мають довільну форму середньої лінії профілів.

Предмет дослідження – структура течії і сумарні характеристики відцентрових нагнітачів в широкому діапазоні дозвукових режимів роботи та шляхи підвищення їх газодинамічних параметрів.

Методи дослідження. Теоретичні положення дисертації базуються на фундаментальних законах газової динаміки та теорії лопаткових машин. Параметри течії у ступені відцентрового нагнітача визначаються за допомогою системи рівнянь Ейлера, записаної з використанням уявлення про функцію струму. Для вирішення системи рівнянь застосовано кінцево - різницеві підходи. Верифікація отриманих результатів розрахунку проведена шляхом зіставлення з експериментальними даними.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше запропоновано метод розрахунково-теоретичного дослідження структури течії та характеристик ступенів відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс, який дозволяє визначати в широкому діапазоні режимів роботи сумарні характеристики та структуру осередненої у коловому напрямку стисливої дозвукової течії в проточній частині, включаючи міжлопаткові канали, урахування прояви в'язких ефектів здійснено шляхом використання узагальнених напівемпіричних залежностей.

2. Вперше розрахунковим шляхом отримані газодинамічні параметри ступенів відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс, що утворені циліндричними або конічними поверхнями та мають довільну форму середньої лінії профілів, які дозволили виявити вплив режиму роботи на структуру течії, особливості обтікання лопаткових вінців та узгодження їх роботи.

3. За допомогою розробленого методу розрахунково-теоретичного дослідження одержані нові дані про вплив змін геометричних параметрів проточної частини, а також профілів робочих коліс, дифузорів, зворотних направляючих апаратів досліджуваних ступенів на структуру течії та їх сумарні характеристики та надані реко-

мендації для їх удосконалення.

Практичне значення одержаних результатів для енергомашинобудівної галузі полягає у створенні на підставі запропонованого методу програмного комплексу (ПК) АхСВ для дослідження структури дозвукової осьосиметричної течії в проточних частинах ступенів відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс, що утворені циліндричними або конічними поверхнями та мають довільну форму середньої лінії профілів. Розроблений ПК дозволяє на підставі заданих геометричних параметрів лопаткових вінців, проточної частини та режиму роботи нагнітача проводити розрахунки течії в широкому діапазоні робочих режимів, а також отримати сумарні характеристики. Постпроцесор ПК дає можливість візуалізувати структуру течії у вигляді ізолій основних параметрів ступеня, що дозволяє підвищити наочність отриманих результатів.

Проведено дослідження структури течії в ступенях відцентрових нагнітачів, отримані сумарні характеристики та поля параметрів дозволили визначити особливості течії на різноманітних режимах та сумісну узгодженість роботи різних елементів проточної частини. Запропоновано удосконалення геометричних параметрів трьох різних ступенів відцентрових нагнітачів ГПА, яке дозволило підвищити коефіцієнт політропічного напору, ККД, або розширити робочий діапазон цих нагнітачів при заданому значенні номінального режиму та при зміні умов експлуатації.

Програмний комплекс і результати розрахункових досліджень застосовано у практиці проектування ПАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя), ПАТ «Турбогаз» (м. Харків), а також використано у навчальному процесі кафедри теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» при підготовці фахівців за спеціальністю «Газотурбінні установки і компресорні станції».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, які виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз існуючих методів розрахунку течії в ступенях ВЦН; розробка методу перевірного розрахунку дозвукової осьосиметричної течії у ступенях відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс, що утворені циліндричними або конічними поверхнями та мають довільну форму середньої лінії профілів, а також способу врахування в'язких ефектів; пошук, аналіз та застосування наведених у відкритому друці співвідношень для визначення втрат в різних елементах ступеня ВЦН, розробка програмного комплексу АхСВ та його тестування шляхом зіставлення з експериментальними даними. Здобувачем проведено чисельні розрахунки структури течії та сумарних характеристик ступенів відцентрових нагнітачів та їх окремих ділянок, здійснено модернізацію трьох ступенів відцентрових нагнітачів шляхом газодинамічного удосконалення проточної частини, а також геометричних параметрів робочого колеса та лопаткового дифузора, що дозволило збільшити сумарні параметри ВЦН у вигляді коефіцієнту політропічного напору і ККД, або розширити діапазон робочих режимів ступенів по витраті.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації доповідалися на: Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні" (м. Харків, 2001, 2003 – 2008, 2010, 2012, 2014 рр.), XIII, XIV і XV Міжнародних науково-технічних конференціях з компресоробудування "Компресорна техніка і пневматика в ХХІ століт-

ті" (м. Суми, 2004 р.; м. Казань, Росія, 2007, 2011 рр.), II Міжнародній науково-технічній конференції "Авіадвигуни XXI століття" (м. Москва, Росія, 2005 р.), Міжнародній науково-технічній конференції з компресоробудування "Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання" (м. Харків, 2006 р.), XI, XII, XIV, XV, XVIII, XIX Міжнародних конгресах двигунобудівників (м. Харків – с. Рибаче, 2006, 2007, 2009, 2010, 2013 рр.; м. Харків – с. Коблево 2014 р.), I і III Міжнародних науково-технічних конференціях «Молодь в авіації: нові рішення і передові технології» – ВАТ "Мотор Січ" (м. Алушта, 2007, 2009 рр.), XIII Всеросійської міжвузівської науково-технічної конференції «Газотурбінні і комбіновані установки та двигуни» (м. Москва, Російська Федерація, 2008 р.), V і XI Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Проблеми енергозбереження України та шляхи їх вирішення" (м. Харків, 2009, 2015 рр.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображено у 18 наукових публікаціях, з них: 6 статей у наукових фахових виданнях України (3 з них – у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз), 1 стаття – у закордонному періодичному фаховому виданні, 11 – у матеріалах конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 154 сторінки; з них 75 рисунків по тексту; 8 рисунків на 10 окремих сторінках; списку використаних джерел зі 126 найменувань на 15 сторінках, 3 додатка на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дано обґрунтування актуальності проведеного дослідження, сформульовано його мету і задачі, визначено наукову новизну, практичну значущість отриманих результатів та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** наведені результати огляду інформації з науково-технічних джерел щодо основних особливостей течії у ступенях відцентрових нагнітачів, зроблено огляд існуючих підходів різних авторів до розрахунку течій в проточних частинах турбомашин, включаючи відцентрові нагнітачі (Дена Г.М., Риса В.Ф., Селєзньова К.П., Гальоркіна Ю.Б., Ізмайлова Р.А., Сальнікова В.С., Сальнікова С.Ю., Косолапова Ю.С. та інших). Чисельний експеримент виступає основою проектування та модернізації ступенів лопаткових машин, наслідком чого є скорочення коштовних експериментальних досліджень та строків розробки. Для отримання остаточного варіанту ступеня проводяться розрахунки течії у одновимірній, двовимірній та просторовій постановках із застосуванням чисельних методів різного рівня складності, що взаємно доповнюють один одного. Значна частина розрахунків припадає на методи аналізу двовимірної течії, за допомогою яких забезпечується раціональний вибір геометричних і режимних параметрів ступенів.

Показано, що перспективною задачею є розробка та удосконалення методів проектування та розрахунку газодинамічних параметрів нагнітачів природного газу, які дозволяють детально враховувати геометричні особливості лопаткових вінців, проточної частини та різноманітні режими експлуатації їх на газопроводах. Важливою рисою таких методів повинна бути можливість оперативно оцінювати вплив

конструктивно-технологічних і експлуатаційних заходів на ефективність нагнітача, що проектується або модернізується. На основі проведеного аналізу обґрунтовано та наведено постановку задачі дослідження та шляхи її реалізації, а також вибрано відповідні до них методи.

У **другому розділі** викладено основи методу перевірного розрахунку стисливої дозвукової осьосиметричної течії, призначений для визначення структури і сумарних характеристик потоку газу в ступені відцентрового нагнітача з радіальними лопатками робочих коліс в широкому діапазоні режимів роботи.

Для розв'язання задачі розрахунку сталої течії нев'язкого нетеплопровідного стисливого газу використовується система рівнянь газової динаміки, що записана в системі координат, яка обертається з постійною кутовою швидкістю $\vec{\omega}$:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{w}) &= 0, \\ (\vec{w} \cdot \vec{\nabla}) \vec{w} + 2\vec{\omega} \times \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p &= 0, \\ \vec{\nabla} \cdot [\vec{w}(\rho E + p)] &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

де $E = c_v T + \frac{w^2 - u^2}{2}$ – питома повна енергія, ρ , p , T – густина, тиск та температура газу, \vec{w} , \vec{u} – вектори швидкостей потоку у відносному та окружному русі, c_v – теплоємність при постійному об'ємі. Система рівнянь замикається рівнянням стану ідеального газу $p = \rho RT$.

Для спрощення рішення задачі та постановки граничних умов в меридіональній площині вводиться система узагальнених координат (ξ, η, φ) (рис. 1 а), у якій вісь φ співпадає з окружним напрямом, а осі ξ і η розташовані у меридіональній площині та збігаються з межами розрахункової області у фізичному просторі. Фізичну область розбито в напрямку осі ξ на підобласті, що відповідають лопатковим вінцям і каналам між ними, та відображено на прямокутну розрахункову область $ABLK$ (рис. 1 б), що вкрита рівномірною розрахунковою сіткою з кроком $\Delta \xi = \Delta \eta = h$.

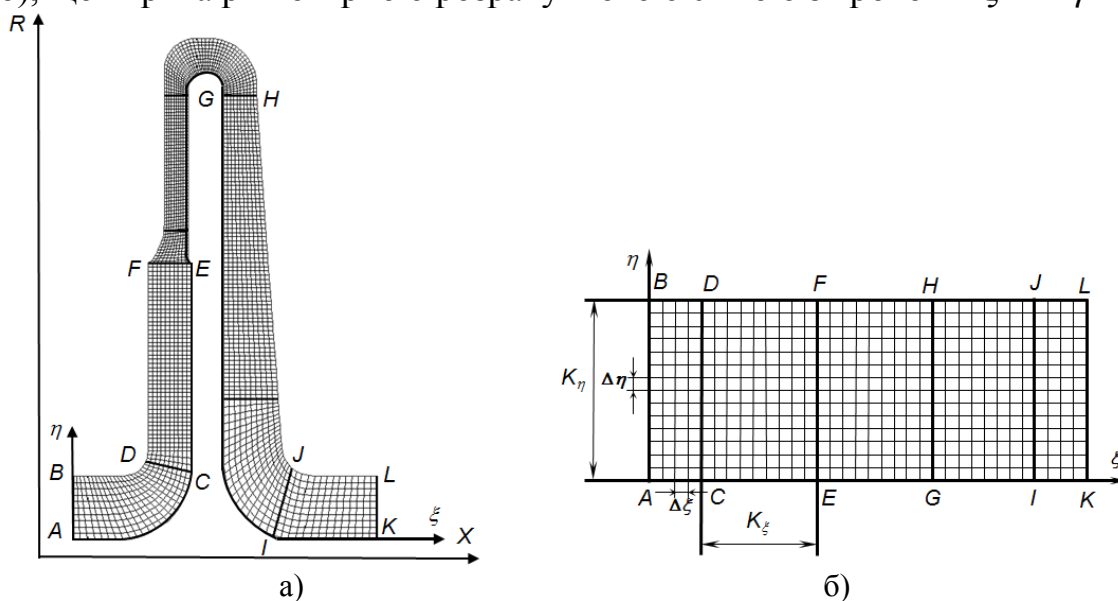
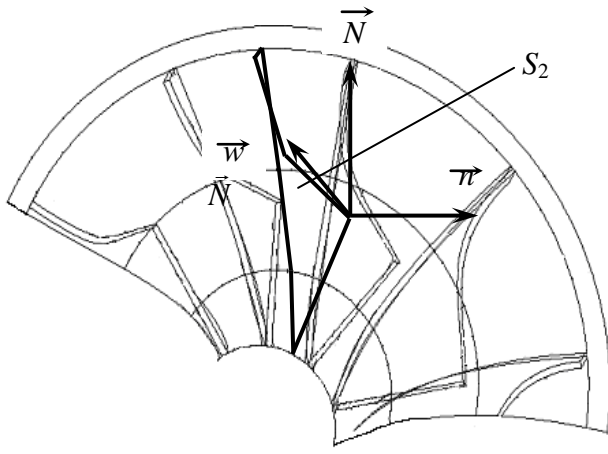


Рисунок 1 – Розрахункова область:
а - область у фізичному просторі; б - область у просторі узагальнених координат

Рисунок 2 – Середина поверхня S_2

При вирішенні системи рівнянь Ейлера використовується функція струму, яка виводиться з проекції рівняння руху (1), що записане у формі Крокко, на вектор $\vec{N} = \vec{n} \times \vec{w}$ (рис. 2)

$$\vec{w} \times (\vec{\nabla} \times \vec{v}) = \vec{\nabla} H - T \cdot \vec{\nabla} S, \quad (2)$$

де v – швидкість в абсолютному русі,

$H = c_p T + \frac{w^2 - u^2}{2}$ – ротальпія, c_p – теплоємність при постійному тиску, S – ентропія.

Після осереднення в окружному напрямі та скалярного множення на вектор \vec{N} рівняння (2) має вигляд

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} - \frac{\partial Q}{\partial \xi} = U + P \cdot A_\eta - Q \cdot A_\xi, \quad (3)$$

де для областей, що зайняті лопатковими вінцями:

$$P = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(\gamma_{\xi\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - \gamma_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right), \quad Q = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(\gamma_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - \gamma_{\eta\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right), \quad U = 2u \cdot \left(n_\eta \frac{\partial r}{\partial \xi} - n_\xi \frac{\partial r}{\partial \eta} \right),$$

$$A_\eta = \frac{1}{w^2} \left(\frac{\partial H}{\partial \eta} - T \frac{\partial S}{\partial \eta} \right), \quad A_\xi = \frac{1}{w^2} \left(\frac{\partial H}{\partial \xi} - T \frac{\partial S}{\partial \xi} \right), \quad \gamma_{ij} = g_{ij} + r^2 \cdot n_i \cdot n_j,$$

а для вільних від лопаткових вінців каналів:

$$P = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(g_{\xi\xi} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - g_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right), \quad Q = \frac{1}{\rho \chi \sqrt{g}} \left(g_{\xi\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \eta} - g_{\eta\eta} \frac{\partial \psi}{\partial \xi} \right), \quad U = 0,$$

$$A_\eta = \frac{1}{v_m^2} \cdot \left(\frac{\partial I^*}{\partial \eta} - T \cdot \frac{\partial S}{\partial \eta} - \frac{\Gamma}{r^2} \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial \eta} \right), \quad A_\xi = \frac{1}{v_m^2} \cdot \left(\frac{\partial I^*}{\partial \xi} - T \cdot \frac{\partial S}{\partial \xi} - \frac{\Gamma}{r^2} \cdot \frac{\partial \Gamma}{\partial \xi} \right).$$

Тут нижні індекси позначають коваріантні компоненти векторів, ψ – функція струму, g – детермінант метричного тензору, χ – коефіцієнт захарашення проточної частини лопатковими вінцями, r – радіус, v_m – проекція абсолютної швидкості на меридіональну площину, I^* – ентальпія загальмованого потоку, Γ – циркуляція.

У рівняння функції струму (3) входить густина, що визначена з проекції рівняння руху (1) на вектор відносної швидкості \vec{w} . Рівняння для визначення густини після перетворення має вигляд

$$w^\xi \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + w^\eta \frac{\partial \rho}{\partial \eta} = \rho \cdot F, \quad (4)$$

де $F = \frac{1}{k-1} \cdot \frac{1}{I} \left(w^\xi \frac{\partial I}{\partial \xi} + w^\eta \frac{\partial I}{\partial \eta} \right)$, верхні індекси позначають контраваріантні компонен-

ти векторів. Отриманий вираз придатний для визначення поля густини як в областях, зайнятих лопатковими вінцями, так і у вільних каналах.

Граничні умови поставлено у фізичній області $ABLK$ (рис. 1 а). У вхідному перетині на лінії AB задають розподіли по радіусу значень повних температури, тиску, кута входу потоку, а також розподіл густини струму або кута нахилу ліній струму до осі нагнітача. На твердих стінках AK і BL , що обмежують проточну частину в меридіональній площині, визначено умови непротікання $\psi = \text{const}$. Для проведення розрахунку задано режим роботи ступеня відцентрового нагнітача: масову витрату G та частоту обертання ротора n , а також геометричні параметри проточної частини та лопаткових вінців, що входять до його складу.

Наведена постановка задачі дозволяє звести весь розрахунок до ітерацій по функції току та густині.

Всі складові рівняння функції току (3) подаються у вигляді частинних похідних і апроксимуються за допомогою кінцево-різницевого співвідношень, що забезпечують другий порядок точності. Для їх апроксимації введено дев'ятиточковий шаблон, однаковий для всієї розрахункової області. Сукупність цих рівнянь, записаних для кожного вузла розрахункової сітки, разом з граничними умовами утворює систему лінійних рівнянь з сильно розрідженою матрицею, для вирішення якої використовується метод Зейделя.

Рівняння густини (4) є диференціальним рівнянням першого порядку. Для його розв'язання використано неявну однокрокову схему, а отримана система лінійних рівнянь вирішується за допомогою методу прогонки.

Урахування в'язких властивостей потоку у запропонованому методі здійснюється шляхом модифікації рівняння руху (1) введенням додаткового члена \vec{D} , що імітує вплив в'язких сил на структуру потоку

$$(\vec{w} \cdot \vec{\nabla}) \cdot \vec{w} + 2\vec{\omega} \times \vec{w} + \vec{\omega} \times \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p = \vec{D}.$$

Вектор \vec{D} , згідно роботам Жуковського М.І., Сіроткіна Я.Л., Denton, Gu та ін., моделює дію дисипативних сил, направлений у бік, протилежний вектору \vec{w} : $\vec{D} = -\vec{w} \cdot \vec{D} / w$, і визначається з умови повного переходу роботи сил тертя в тепло: $\vec{D} \cdot \vec{w} = T \vec{w} \cdot \vec{\nabla} S$. Для визначення приросту ентропії необхідно визначити відповідну кожному елементу проточної частини роботу дисипативних сил L_r .

В розробленому методі врахування в'язких властивостей потоку у лопаткових вінцях та вільних каналах ступеня ВЦН базується на обчисленні в ході ітераційного процесу коефіцієнтів втрат енергії (втрати на тертя і вихроутворення, повороти потоку, нерозрахункове обтіканні лопаткових вінців, тощо) та кутів відставання потоку. Величини втрат енергії і поправки до кутів виходу потоку з лопаткових апаратів визначені для кожної розрахункової підобласті за допомогою узагальнених напівемпіричних залежностей щодо стаціонарних відцентрових нагнітачів, наведених в літературних джерелах (Ден Г.М., Рис В.Ф., Селезньов К.П., Гальоркін Ю.Б., Рекстін Ф.М., Howell A., Baghdadi S. та ін.) та додатково досліджених. Врахування кутів відставання потоку здійснюється за допомогою корекції форми серединної міжлопаткової поверхні струму.

Відповідно до алгоритму метода розрахунку розроблено програмний комплекс (ПК) АхСВ, призначений для чисельного моделювання осьосиметричної дозвукової течії у ступенях відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками РК та визначення структури потоку і сумарних характеристик в широкому діапазоні режимів роботи.

В **третьому розділі** представлені результати тестування ПК, проведеного шляхом зіставлення результатів розрахунку з експериментальними даними, а також аналітичним рішенням. Виконані методичні дослідження впливу густоти розрахункової сітки на точність результатів і збіжність рішення дозволили визначити практично придатний діапазон зміни густоти розрахункової сітки.

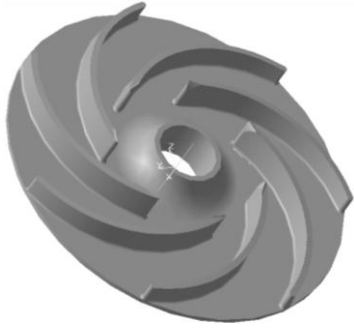


Рисунок 3 – Просторова модель робочого колеса ВЦН

За допомогою програмного комплексу АхСВ досліджено течію у робочому колесі (РК) відцентрового нагнітача, просторову модель якого показано на рис. 3, та розраховані його сумарні характеристики, які отримано у відносних величинах у вигляді залежностей коефіцієнта адіабатичного напору ψ_{ad}^* і адіабатичного ККД в параметрах загальмованого потоку η_{ad}^* від коефіцієнта витрати φ_0 . Результати зіставлення розрахункових даних з експериментальними наведені на рис. 4.

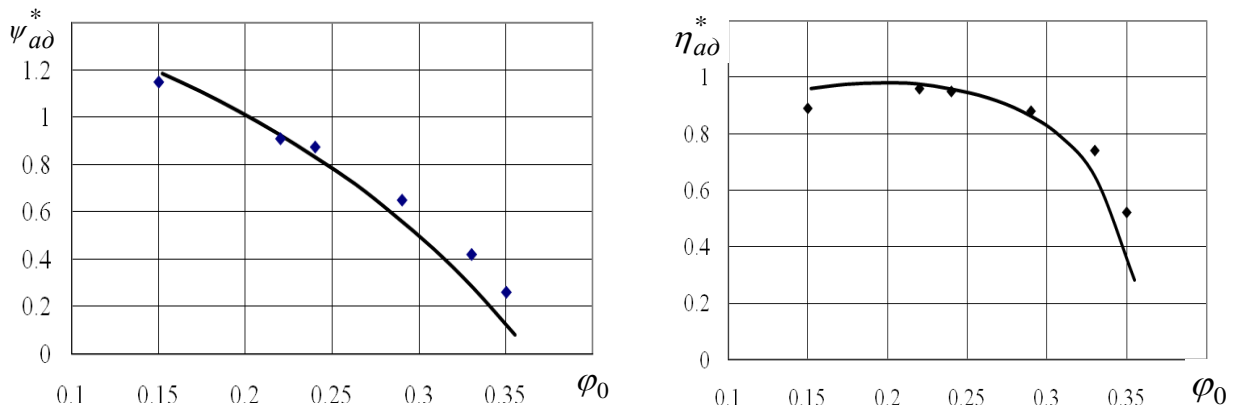


Рисунок 4 – Сумарні характеристики робочого колеса:
 ◆ – експеримент, ———— – розрахунок

На "розрахунковому" режимі ($\varphi_0 = 0,22$), що відповідає максимуму ККД на експериментальній характеристиці, за допомогою графічного постпроцесора ПК АхСВ побудовані ізолінії чисел Маха (рис. 5 а), тиску та температури загальмованого потоку (рис. 5 б та 5 в відповідно), які відображають фізичну картину течії у робочому колесі. Для трьох режимів за витратою побудовано розподіл кута натікання потоку на лопатки РК ($i = \beta_{12} - \beta_1$) по висоті проточної частини (рис. 6). Зменшення кута натікання на режимах з підвищеною витратою призводить до зменшення енергообміну і падінню ККД, що знайшло відображення на рис. 4.

Верифікація запропонованого методу проведена також на прикладі першого ступеня відцентрового нагнітача НЦ-6.3/67К-1.7. На рис. 7 представлена тривимірна модель ступеня, що складається з радіального робочого колеса, лопаткового дифузора (ЛД) і одноярусного зворотного направляючого апарату (ЗНА).

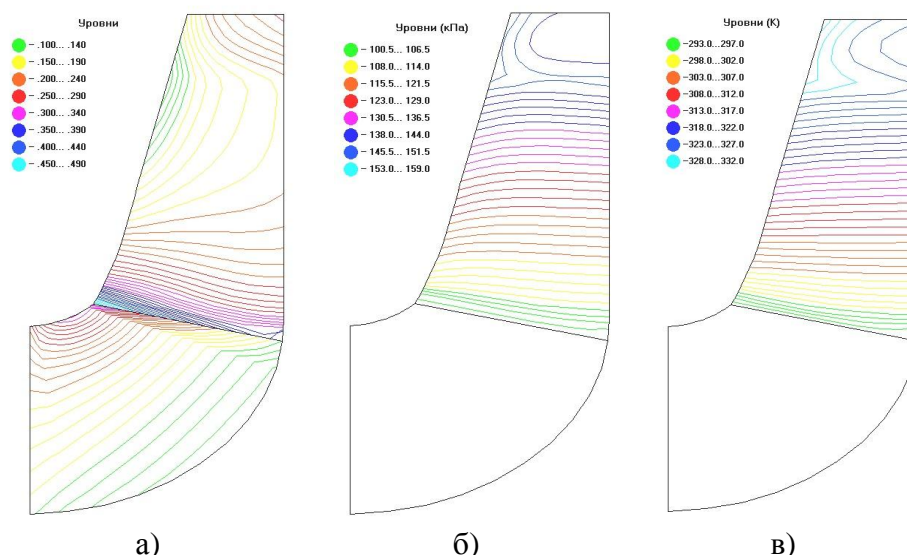


Рисунок 5 – Ізолінії параметрів у проточній частині на режимі $\varphi_0 = 0,22$: а - числа Маха (M_V - в каналі перед РК, M_w - в робочому колесі); б – тиск; в – температура

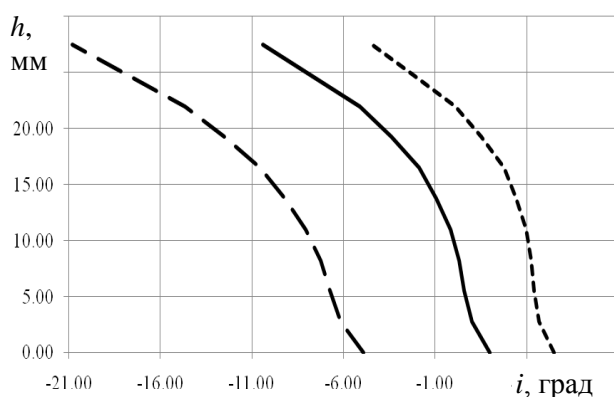


Рисунок 6 – Розподіл кутів натікання на РК по висоті проточної частини:

- - на режимі $\varphi_0 = 0,17$;
- - на режимі $\varphi_0 = 0,22$;
- · - · - · - - - - на режимі $\varphi_0 = 0,33$

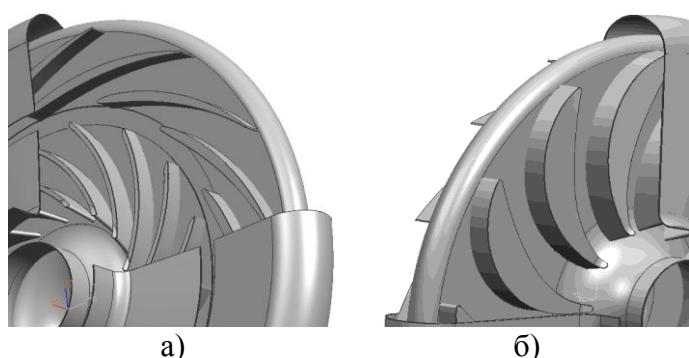
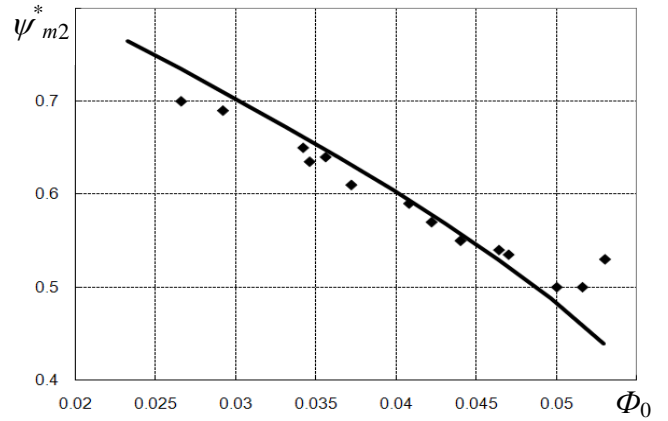
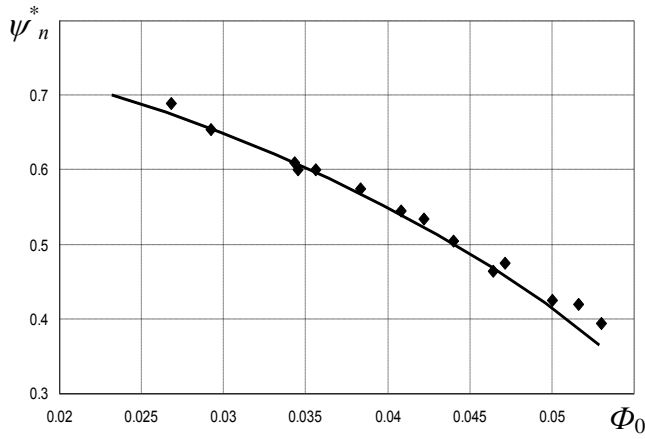


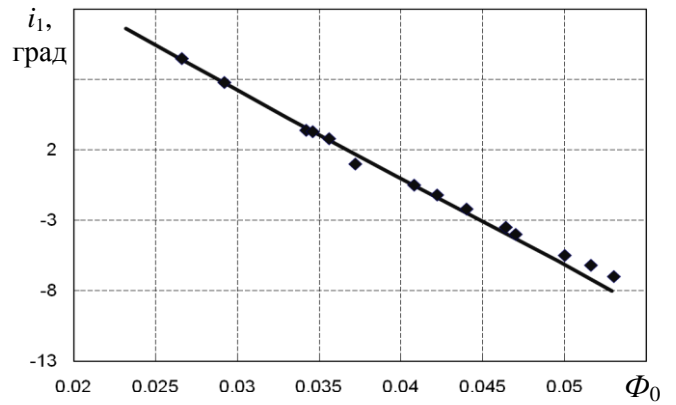
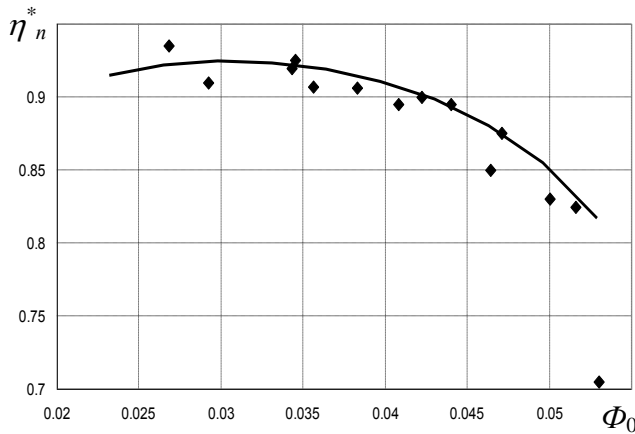
Рисунок 7 – Твердотільна модель першого ступеня НЦ-6.3/67К-1.7: а – РК та ЛД; б - ЗНА

Дослідження характеру течії у ступені даного ВЦН проводилось поетапно. Спочатку отримано сумарну характеристику робочого колеса у вигляді залежностей коефіцієнту політропічного напору ψ_n^* та політропічного ККД в параметрах загальмованого потоку η_n^* від умовного коефіцієнта витрати за умов всмоктування Φ_0 та проведено її зіставлення з експериментальними даними (рис. 8). Крім того після детального дослідження структури течії у робочому колесі і отриманні основних параметрів потоку на різних режимах за витратою зроблено зіставлення з результатами експериментальних досліджень, що відображено на рис. 9 у вигляді залежностей теоретичного напору ψ_{m2}^* від умовного коефіцієнта витрати Φ_0 (рис. 9 а) та кута натікання на лопатки РК i_1 від Φ_0 (рис. 9 б).

На рис. 10 наведено характеристику досліджуваного ступеня в цілому, з якої можна зробити висновок, що чисельне моделювання потоку газу показало задовільне узгодження результатів розрахункових та експериментальних досліджень.



а)



б)

Рисунок 8 – Сумарні характеристики робочого колеса:

- ◆ – експеримент;
- – розрахунок ПК АхСВ

Рисунок 9 – Зіставлення результатів чисельного та експериментального досліджень у вигляді залежностей:

а – $\psi_{m2}^* = f(\Phi_0)$; б – $i_1 = f(\Phi_0)$

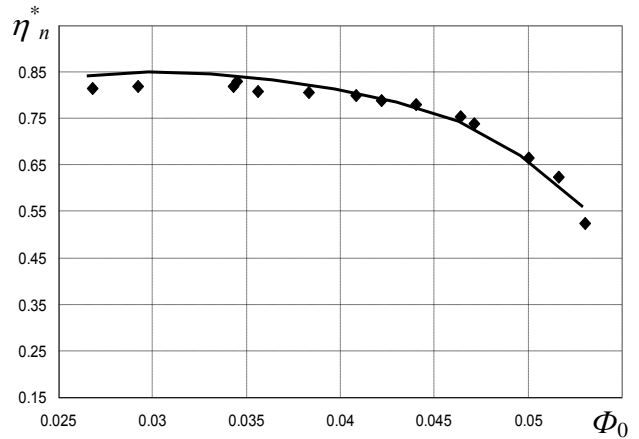
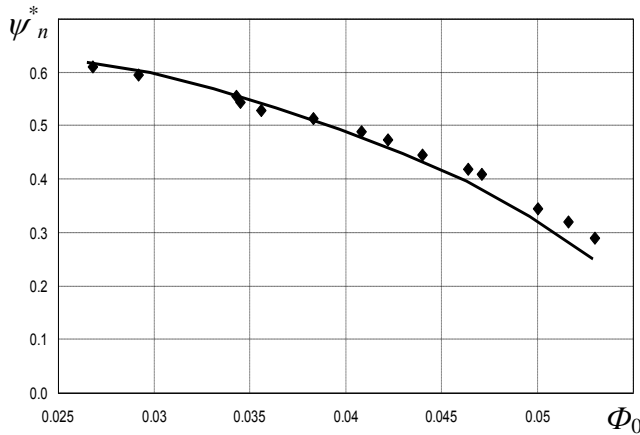


Рисунок 10 – Сумарна характеристика ступеня ВЦН НЦ-6.3/67К-1.7

У четвертому розділі представлені результати дослідження течії в ступенях відцентрових нагнітачів, на підставі якого розглянуті та запропоновані шляхи удосконалення їх геометричних параметрів для підвищення ККД, напору або розширення діапазону робочих режимів.

Ступінь «А» складається з робочого колеса, лопаткового дифузора, зворотного направляючого апарату і каналів між ними. За допомогою ПК АхСВ проведено розрахунок структури течії і сумарних характеристик ступеня на режимі за частотою обертання $M_{u2} = 0,6$. Метою його удосконалення стало підвищення напору та ККД

для використання у якості змінної проточної частини ВЦН.

Для підвищення коефіцієнта напору рекомендовано здійснювати раціональний вибір величини вихідного кута і форми середньої лінії профілю лопатки у фронтальній площині, включаючи використання S-подібної. На рис. 11 надані перерізи лопаток РК з різними значеннями геометричних кутів на виході β_{2c} і формами середньої лінії.

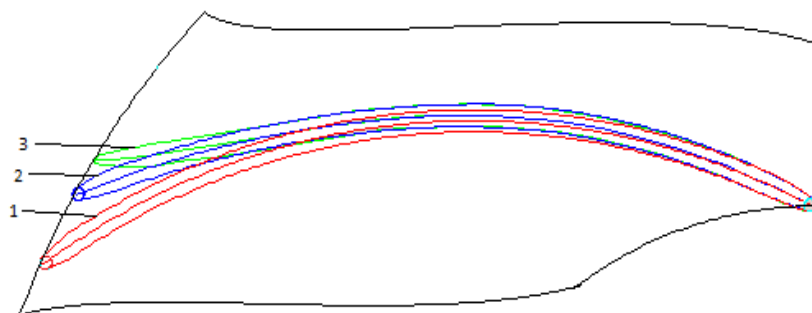


Рисунок 11 – Варіанти перерізів лопаток РК з різними формами середньої лінії і значеннями кутів виходу: 1 варіант - середня лінія - дужка кола, $\beta_{2c} = 28$ град (вихідна лопатка); 2 варіант - середня лінія - дужка кола, $\beta_{2c} = 39$ град; 3 варіант - S-подібна середня лінія, $\beta_{2c} = 55$ град

Взаємодія між робочим колесом і лопатковим дифузorzом багато в чому визначає характер течії і суттєво впливає на характеристики даних вузлів. На рис. 12 а показано ізолінії чисел Маха, що отримані за допомогою ПК АхСВ, в проточній частині вихідного варіанта ступеня ВЦН на ділянці, що включає щілинний і лопатковий дифузори, на «розрахунковому» режимі. Згущення ізоліній на вході в ЛД відзначає ударний характер його обтікання. Варіація геометричного кута виходу β_{2c} та форми середньої лінії дозволила покращити роботу ЛД і ступеня у цілому.

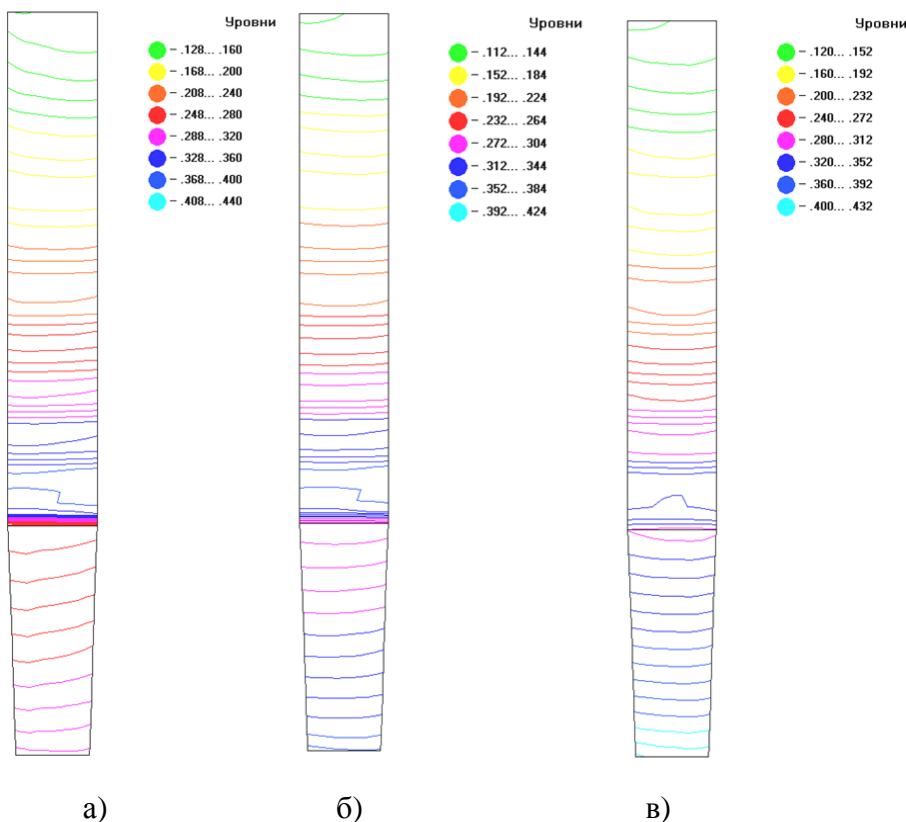


Рисунок 12 – Ізолінії чисел Маха в проточній частині щілинного і лопаткового дифузorzів ступеня «А» при різних варіантах виконання лопатки РК на «розрахунковому» режимі:

а - 1 варіант; б - 2 варіант; в - 3 варіант

Використання лопаток РК, що мають S-подібну середню лінію та кута $\beta_{2c} = 55$ град, призводить до безударного обтікання лопатки ЛД. На рис. 13 показано розподіл кутів натікання на лопатки ЛД по висоті проточної частини залежно від прийнятого варіанту виконання лопаток РК, який підтверджує поліпшення умов обтікання ЛД. Кут натікання на «розрахунковому» режимі знижує своє значення до номінального на середній по висоті каналу лінії току, що дає можливість знизити втрати в ЛД і тим самим підвищити ККД ступеня в цілому.

На рис. 14 зображені сумарні характеристики трьох варіантів ступеня. Ступінь ВЦН з лопатками робочого колеса з S-подібною середньою лінією забезпечує найбільші значення коефіцієнта політропічного напору з трьох розглянутих варіантів та має більш пологі характеристики, що важливо при експлуатації ВЦН у складі ГПА при можливій зміні режиму його роботи.

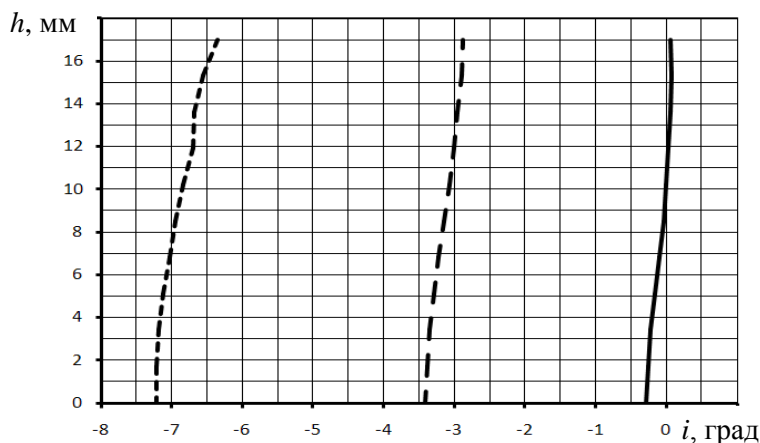


Рисунок 13 – Розподіл кутів натікання на вході в ЛД на «розрахунковому» режимі:
 - - - - - лопатка РК по 1 варианту;
 - · - · лопатка РК по 2 варианту;
 ——— лопатка РК по 3 варианту

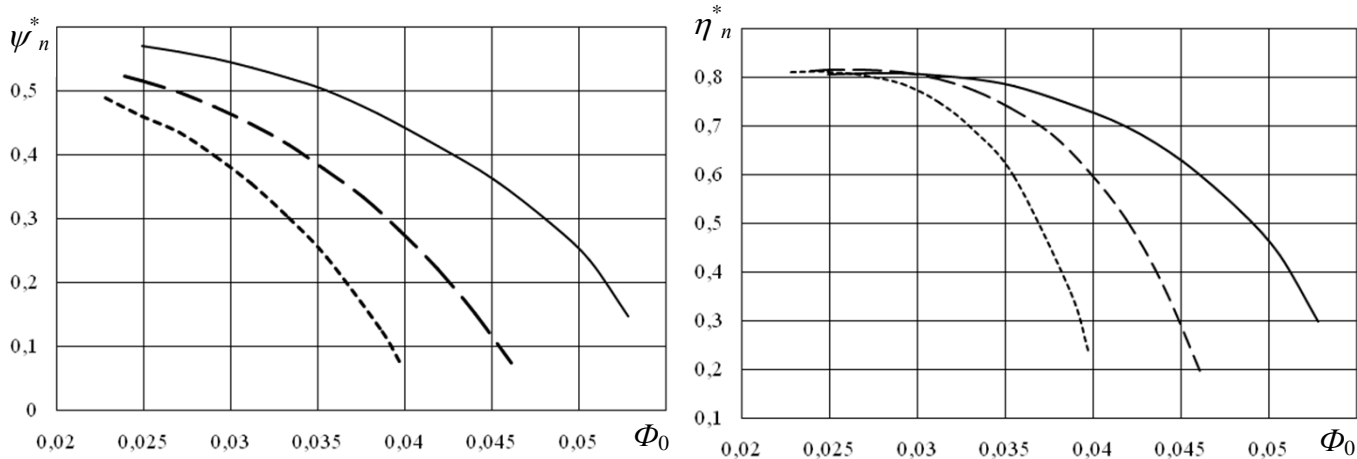


Рисунок 14 – Сумарні характеристики ступеня з різними формами профілів РК:
 - - - - - 1 вариант; - · - · 2 вариант; ——— 3 вариант

Об'єктом подальшого дослідження обрано ступінь «Б», що складається з робочого колеса, яке має радіальні лопатки з S-подібною середньою лінією профілів, лопаткового дифузора, зворотного направляючого апарату та криволінійних каналів між ними. Лопаткові вінці утворені циліндричними поверхнями.

У зв'язку зі зміною умов експлуатації ступеня «Б» (перехід на знижені витрати робочого тіла при незмінній частоті обертання ротора) виявилася необхідність узгодження роботи лопаткового дифузора та робочого колеса. При переході на новий «розрахунковий» режим спостерігається ударний вхід на лопатки ЛД, про що свідчать ізолінії чисел Маха (рис. 15 а). Для поліпшення якості обтікання лопаткового дифузору досліджено варіант виконання його лопаток зі зменшеним значенням геометричного кута входу профілю ЛД α_{32} при незмінних значеннях інших геометричних параметрів профілю лопатки. У модифікованому ЛД течія носить безударний характер (рис. 15 б).

Сумарні характеристики ступеня «Б» з поліпшеним значенням геометричного кута входу профілю ЛД приведені в зіставленні з характеристиками вихідного варіанту ступеня в безрозмірних величинах $\psi_n^* = f(\Phi_0)$ та $\eta_n^* = f(\Phi_0)$ на рис. 16.

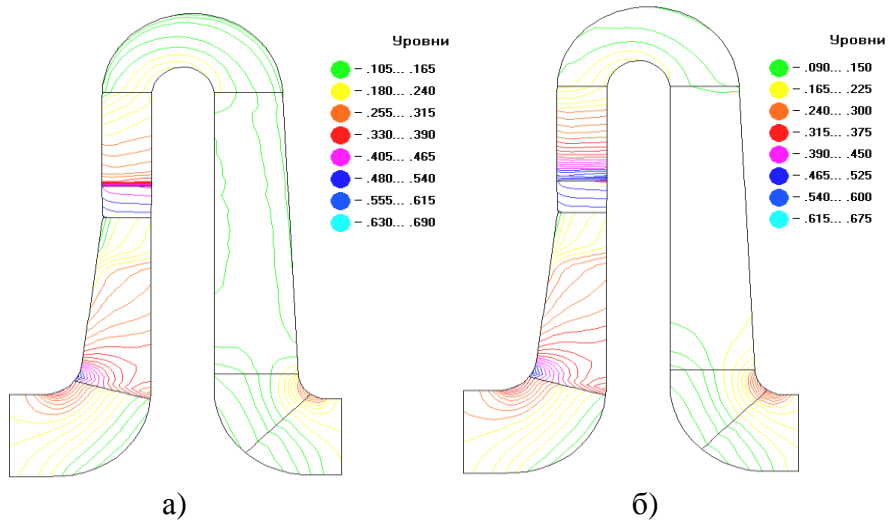


Рисунок 15 – Ізолії чисел Маха в проточній частині ступеня «Б» з різними геометричними кутами на вході в ЛД на «розрахунковому» режимі:
а - вихідний ЛД; б - модифікований ЛД

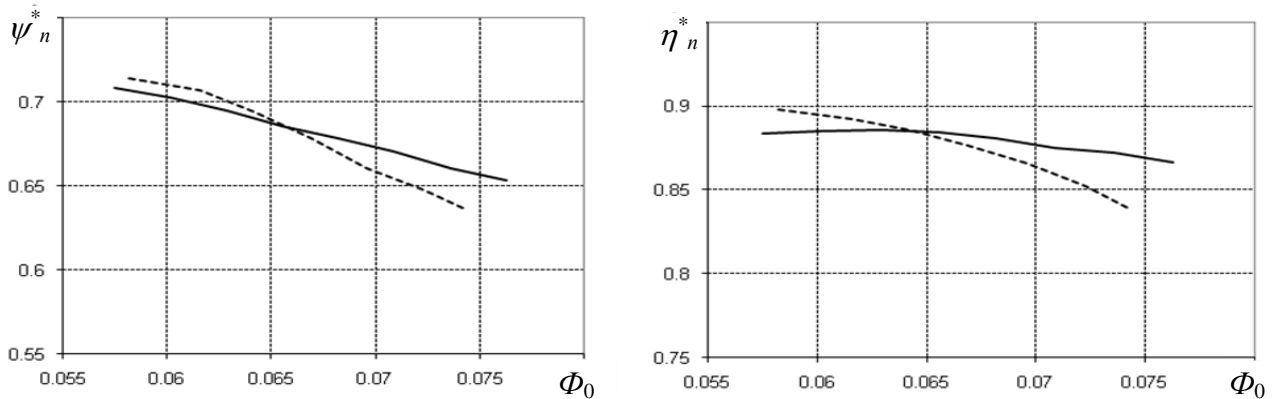


Рисунок 16 – Сумарна характеристика ступеня «Б»:
—— - вихідний геометричний кут α_{32} ; - - - - модифікований геометричний кут α_{32}

Далі представлені результати удосконалення вихідного ступеня «В», до складу якого входить радіальне РК з лопатками, що образовані конічними поверхнями, та безлопатковий дифузор (БЛД). Просторову модель вихідного ступеня зображено на рис. 17. Удосконалення ступеня передбачало заміну безлопаткового дифузора лопатковим. Відмінність проточних частин ступеня ВЦН схематично представлено на рис. 18, де варіант ступеня з БЛД позначено синіми лініями, а з ЛД - червоними.

За допомогою ПК АхСВ проведено аналіз течії у вихідному та модернізованому варіантах ступеня «В» та отримано сумарні характеристики: з вихідним БЛД (суцільна лінія), з ЛД у вихідній проточній частині (штрихова лінія) та з ЛД у розширеній проточній частині (тонка суцільна лінія) у вигляді залежностей коефіцієнта політропічного напору і ККД від умовного коефіцієнта витрати (рис. 19). Можна зробити висновок, що застосування ЛД у вихідній проточній частині веде до різкого звуження ширини робочого діапазону, а також до зменшення ККД і напору на режимах підвищеної витрати завдяки зменшенню міжлопаткового каналу. На рис. 20 представлено ізолії чисел Маха на "розрахунковому" режимі в ступені ВЦН з трьома варіантами виконання дифузора, неузгодженість роботи РК та ЛД на рис. 20 в спостерігається у вигляді згущення ізолій, що свідчить про ударний вхід на лопатки ЛД, який призводить до збільшення втрат.

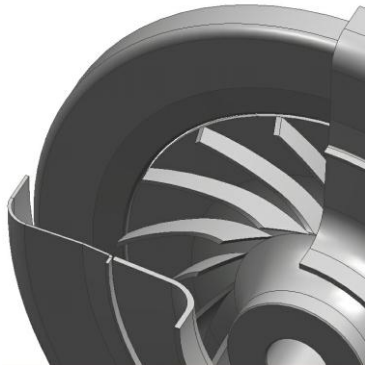


Рисунок 17 – Просторова модель ступеня «В»

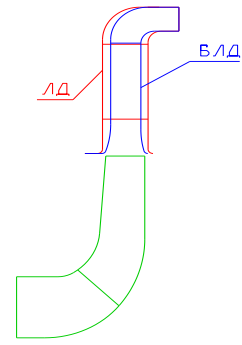


Рисунок 18 – Проточна частина двох варіантів ступеня «В»

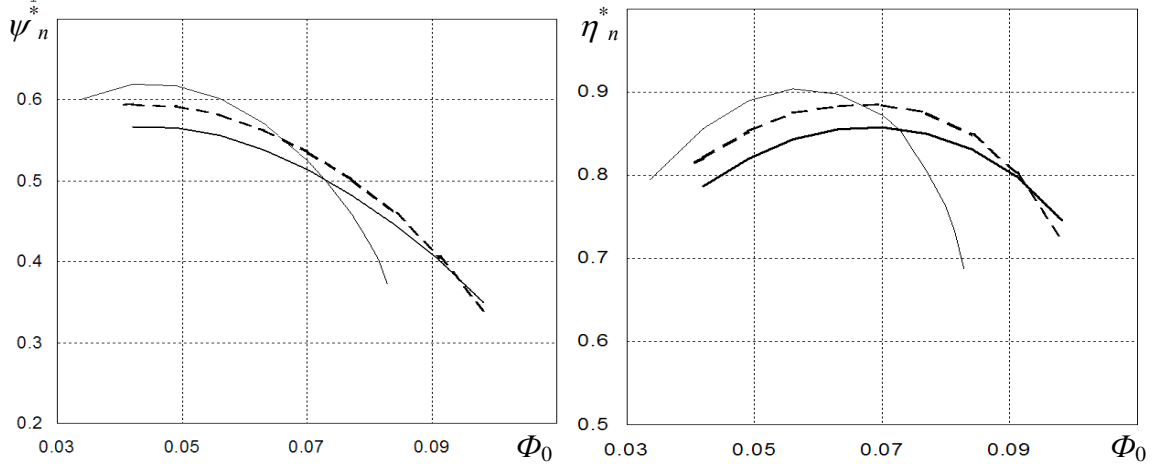


Рисунок 19 – Сумарна характеристика ступеня «В» з вихідним БЛД і двома варіантами ЛД:
 ——— - ступінь з БЛД; - - - - - - ступінь з ЛД в модифікованій проточній частині;
 - · - · - · - ступінь з ЛД у вихідній проточній частині

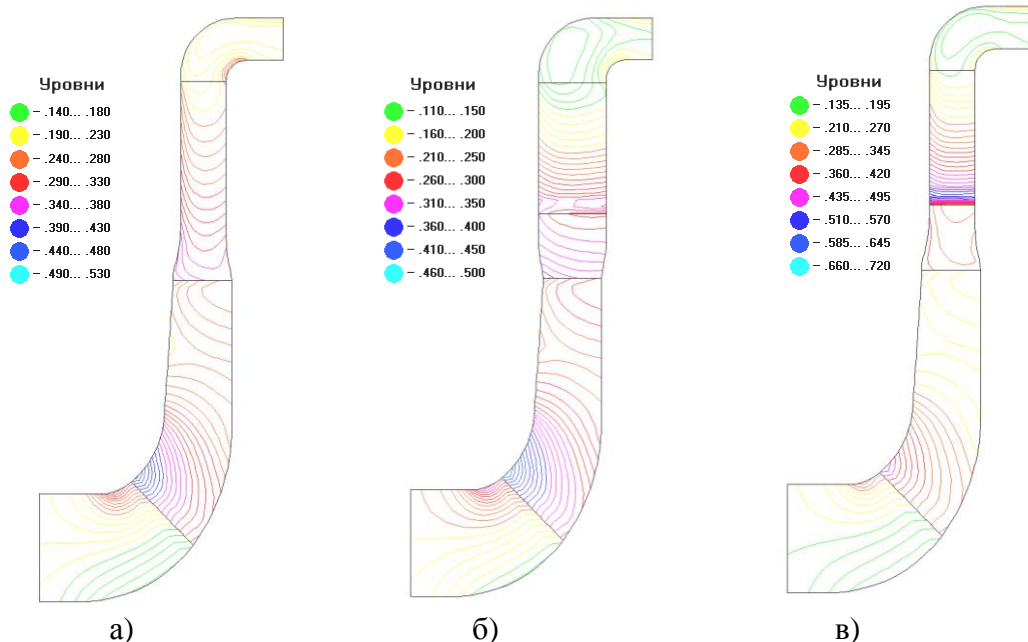


Рисунок 20 – Ізолінії чисел Маха на «розрахунковому» режимі в ступені «В» з трьома варіантами виконання дифузора: а – ступінь з БЛД; б – ступінь з ЛД в модифікованій проточній частині; в – ступінь з ЛД у вихідній проточній частині

Згідно з проведеними розрахунками удосконалення ступеня нагнітача призвело до зростання напору та ККД при практично непомітному звуженні діапазону робочих режимів.

У додатках наведено акти використання результатів дисертаційної роботи у ПАТ «Мотор Січ» та ПАТ «Турбогаз», а також в навчальному процесі кафедри теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу розробки методу розрахунково – теоретичного дослідження структури дозвукової стисливої осьосиметричної течії в ступенях відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс та сумарних характеристик для подальшого удосконалення їх роботи.

1. Розроблено метод розрахунку осьосиметричної стисливої течії в ступенях відцентрових нагнітачів, який дозволяє моделювати дозвуковий потік газу в широкому діапазоні режимів роботи та враховувати геометричні особливості радіальних робочих коліс, лопаткових і безлопаткових дифузорів, зворотних направляючих апаратів. В основу методу покладено рішення системи рівнянь руху нев'язкого нетеплопровідного стисливого газу. Моделювання дисипативних властивостей течії здійснено шляхом введення в праву частину рівняння Ейлера, записаного в енергетичній формі, додаткового члена, який характеризує зміну ентропії. Для визначення величини приросту ентропії використані опубліковані узагальнені напівемпіричні залежності.

2. За допомогою розробленого програмного комплексу АхСВ проведено верифікацію методу розрахунку, яка показала задовільну точність узгодження результатів числових досліджень течій в криволінійних каналах, робочих колесах, окремих елементах і ступенях в цілому з даними експериментальних досліджень, а також з аналітичним рішенням.

3. Проведено чисельне дослідження течії в ступенях відцентрових нагнітачів для визначення їх сумарних характеристик і структури течії, а також виявлено вплив зміни геометричних параметрів меридіональних обводів проточної частини, форми середньої лінії профілів, величин геометричних кутів лопаток робочого колеса та лопаткового дифузора і різних варіантів виконання дифузора на структуру течії і сумарні характеристики ступенів ВЦН.

4. На підставі виконаного детального аналізу запропоновано удосконалення геометричних параметрів трьох ступенів ВЦН. Ступінь «А» модифіковано шляхом зміни форми середньої лінії, а також величини конструктивного кута лопатки на виході з РК, що дозволило збільшити коефіцієнт політропічного напору на ~15%, розширити зону робочої характеристики нагнітача, а також зробити її більш пологою при незначному збільшенні політропічного ККД на номінальному режимі. Модернізація ступеня «Б» полягала в корекції форми меридіональних обводів проточної частини та зміні конструктивного кута лопатки на вході в ЛД, що призвело до поліпшення узгодження роботи РК і ЛД та збільшенню напору і ККД на ~3% кожен на «розрахунковому» режимі. Удосконалення ступеня «В» здійснено шляхом використання в змінній проточній частині лопаткового дифузора замість безлопаткового, що спричинило збільшення коефіцієнта політропічного напору і ККД в «розрахунковій» точці характеристики.

5. Позитивні висновки актів використання результатів дисертаційної роботи у ПАТ «Мотор Січ» та ПАТ «Турбогаз» довели доцільність запропонованого методу розрахунку. Результати дисертаційної роботи застосовано у навчальному процесі кафедри теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Брысина К.В. (Фесенко К.В.) Единый подход к исследованию двумерных течений в осевых, диагональных и центробежных ступенях компрессоров / Л.Г. Бойко, К.В. Брысина, М.А. Ковалев // *Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. праць.* – Харків: Держ. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2000.– Вип. 15. – С. 73-75.

Здобувачем запропоновано алгоритм побудови розрахункової сітки, особливістю якої є значний кут повороту обводів в меридіональній площині.

2. Фесенко К.В. Метод расчета до- и трансзвуковых течений в проточной части центробежного компрессора / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // *Компрессорная техника и пневматика.* – Москва: «КХТ». – 2005. – №1. – С. 20-23.

Здобувачем представлено метод перевірного розрахунку дозвукової осьосиметричної течії в ступенях ВЦН з радіальними лопатками робочих коліс та результати апробації ПК АхСВ, за допомогою якого проведено розрахунок структури течії ділянки проточної частини ступеня, що складається з робочого колеса, щільного і лопаткового дифузоров.

3. Фесенко К.В. Метод поверочного расчета течения в проточной части центробежного компрессора и его апробация / Л.Г. Бойко, А.Е. Демин, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков: «ХАИ». – 2005.– №2(18). – С. 42-48.

Подальший розвиток ПК АхСВ, що виконав здобувач, дозволив зробити перевірений розрахунок осьосиметричної течії і отримати сумарні характеристики ступеня ВЦН в цілому.

4. Фесенко К.В. Численное исследование двумерного течения в проточной части ступени центробежного нагнетателя / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // *Вестник двигателестроения.* – Запорожье: ОАО «Мотор Сич». – 2006. – №3. – С. 8-13.

Здобувачем проведено чисельне дослідження течії і сумарних характеристик у проміжному ступені ВЦН, що складається з РК, БЛД, дворядного ЗНА і криволінійних каналів між ними.

5. Фесенко К.В. Методы расчетного исследования течений в осевых и центробежных компрессорах и результаты их практического использования / Л.Г. Бойко, А.Е. Демин, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.П. Максимов // *Авиационно-космическая техника и технология.* – Харьков: «ХАИ». – 2011. – №10(87). – С. 63-69.

Здобувачем запропоновано інтеграцію ПК АхСВ в комплекс методів перевірного розрахунку, розроблених у проблемній науково-дослідній лабораторії газотур-

бінних двигунів і установок (Аеродинаміки компресорів) Національного аерокосмічного університету ім. М.С. Жуковського «ХАІ».

6. Фесенко К.В. Повышение эффективности центробежного нагнетателя путем модификации геометрии проточной части и лопаточных венцов / К.В. Фесенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: Сб. науч. тр. – Харків: Нац. аерокосм. ун-т «ХАІ». – 2014. – Вып. 66. – С. 20-26.

7. Фесенко К.В. Модернизация ступени центробежного компрессора газоперекачивающего агрегата / Л.Г. Бойко, К.В. Фесенко, А.Ю. Самойлов // Авиационно-космическая техника и технология. – Харьков: «ХАИ». – 2015. – №3(120). – С. 84-89.

Здобувачем досліджено вплив зміни форми середньої лінії і величини геометричного кута виходу лопатки РК на структуру потоку і сумарні характеристики ступеня ВЦН.

8. Фесенко К.В. Разработка алгоритма построения расчетной сетки для анализа течения в центробежной ступени / К.В. Фесенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2001»: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». – 2001. – С. 44.

9. Фесенко К.В. Математическое моделирование течения в ступени ЦБК / Л.Г. Бойко, К.В. Фесенко // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2004»: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут». – 2004. – С. 75.

Здобувачем представлено метод перевірного розрахунку осьосиметричної течії та результати її моделювання в ступені ВЦН.

10. Фесенко К.В. Исследование структуры течения и характеристик ступеней центробежных нагнетателей / Л.Г. Бойко, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // Молодежь в авиации: новые решения и передовые технологии: Тезисы докладов. Международная научно-техническая конференция молодых специалистов авиамоторостроительной отрасли – Алушта: ОАО «Мотор Сич». – 2007. – С. 122-123.

Здобувачем досліджено структуру течії та сумарні характеристики ступенів ВЦН, показано вплив геометричних параметрів ступеня на розподіл за висотою проточної частини параметрів потоку.

11. Фесенко К.В. Математическая модель течения в ступенях центробежных компрессоров / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин, В.Н. Довженко // Труды XIV Международной научно-технической конференции по компрессорной технике. Том I / ЗАО «НИИТурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа». – Казань: Изд-во «Слово». – 2007. – С. 340-348.

Показано результати розрахунків ряду ступенів ВЦН, що виконані здобувачем на основі запропонованого методу розрахунку.

12. Фесенко К.В. Исследование ступеней центробежных компрессоров с пространственными (коническими) лопатками / Л.Г. Бойко, Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, Ю.С. Бухолдин // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2007»: Тези доповідей. – Харків:

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – 2007. – С. 135.

Здобувачем розроблено алгоритм завдання геометрії конічної лопатки робочого колеса, удосконалено ПК АхСВ та показано результати верифікації.

13. Фесенко К.В. Исследование течения в ступенях центробежных компрессоров с помощью программного комплекса АхСВ / Е.С. Барышева, К.В. Фесенко, А.Н. Нефедов // Міжнародна науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2008»: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – 2008. – Том 1. – С. 149.

За допомогою ПК АхСВ здобувачем зроблено дослідження течії в модельному ступені ВЦН та його подальшу модернізацію з метою підвищення параметрів шляхом заміни безлопаткового дифузора лопатковим.

14. Фесенко К.В. Расчетное исследование течения в ступенях центробежных нагнетателей / К.В. Фесенко // XIV Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2009. – С. 49.

15. Фесенко К.В. Исследование влияния изменения геометрических параметров на течение в ступени центробежного нагнетателя / Л.Г. Бойко, К.В. Фесенко // XV Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2010. – С. 27.

Здобувачем досліджено вплив різноманітних геометричних параметрів ступенів ВЦН на сумарні характеристики та структуру течії.

16. Фесенко К.В. Исследование характеристик центробежного нагнетателя и его совершенствование / К.В. Фесенко // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2010»: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». – 2010. – Том 1. – С. 100.

17. Фесенко К.В. Совершенствование термогазодинамических параметров ступеней центробежного нагнетателя / Л.Г. Бойко, К.В. Фесенко // XIX Міжнародний конгрес двигунобудівників: Тези доповідей. – Харків: Нац. аерокосмічний ун-т «Харк. авіац. ін-т». – 2014. – С. 77.

Здобувачем проведено розрахункове дослідження течії у ступенях ВЦН та запропоновані шляхи їх удосконалення.

18. Фесенко К.В. Модернизация ступени центробежного нагнетателя природного газа с целью повышения его параметров / А.Ю. Самойлов, К.В. Фесенко // Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні ІКТМ-2014»: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», 2014. – Том 1. – С. 52.

Здобувачем проведено модернізацію ступеня ВЦН з метою вдосконалення його параметрів.

АНОТАЦІЇ

Фесенко К.В. Метод розрахунково-теоретичного дослідження структури течії та характеристик ступенів відцентрових нагнітачів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2015 р.

В дисертації розроблено метод розрахунково-теоретичного дослідження структури течії та характеристик ступенів відцентрових нагнітачів з радіальними лопатками робочих коліс, який дозволяє визначати в широкому діапазоні режимів роботи сумарні характеристики та структуру осередненої у коловому напрямку стисливої дозвукової течії в проточній частині, включаючи міжлопаткові канали. Для врахування в'язких ефектів використані узагальнені напівемпіричні залежності, що використовуються для розрахунку відцентрових нагнітачів. Запропонований метод дозволяє врахувати геометричні особливості радіальних робочих коліс з лопатками, що образовані циліндричними або конічними поверхнями, лопаткових і безлопаткових дифузорів, зворотних направляючих апаратів та криволінійних обводів проточних частин, а також оцінювати узгодженість їх сумісної роботи.

За допомогою розробленого програмного комплексу АхСВ проведено верифікацію методу розрахунку, яка показала задовільну точність зіставлення результатів числових досліджень течій в ступенях ВЦН з даними експериментальних досліджень та з аналітичним рішенням.

Проведено дослідження впливу геометричних параметрів проточної частини і лопаткових вінців на структуру течії і сумарні характеристики ступенів ВЦН. На підставі виконаного детального аналізу запропоновано удосконалення геометричних параметрів трьох ступенів ВЦН з метою підвищення їх напору, ККД або розширення робочої зони характеристики.

Ключові слова: відцентровий нагнітач, метод перевірного розрахунку, структура осьосиметричної дозвукової течії, врахування в'язких ефектів, сумарні характеристики, модифікація геометричних параметрів.

Фесенко К.В. Метод расчетно-теоретического исследования структуры течения и характеристик ступеней центробежных нагнетателей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.16 – турбомашини и турбоустановки. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2015 г.

В диссертации разработан метод расчетно-теоретического исследования структуры течения и характеристик ступеней центробежных нагнетателей с радиальными лопатками рабочих колес, который позволяет определять в широком диапазоне режимов работы суммарные характеристики и структуру осредненного в окружном направлении сжимаемого дозвукового течения в проточной части, включая межлопаточные каналы. Для учета вязких эффектов использованы обобщенные полуэмпирические зависимости, используемые при анализе течения в центробежных нагнетателях. Данный метод расчета позволяет учитывать геометрические особенности ра-

диальных рабочих колес с лопатками, образованными цилиндрическими и коническими поверхностями, безлопаточных и лопаточных диффузоров, обратных направляющих аппаратов.

На основе предложенного метода разработан программный комплекс АхСВ, который позволяет проводить численный анализ двумерного дозвукового течения в ступенях центробежных нагнетателей, определять поля газотермодинамических параметров потока газа и суммарные характеристики ступеней, а также их отдельных элементов. Верификация разработанного метода расчета показала удовлетворительную точность согласования результатов численных исследований течений в криволинейных каналах, рабочих колесах, отдельных элементах и ступенях в целом с данными экспериментальных исследований, а также с аналитическим решением.

С помощью предложенного метода и ПК АхСВ проведено исследование влияния различных геометрических параметров проточной части и лопаточных венцов на структуру течения и суммарные характеристики ступеней ЦБН, а именно формы средней линии и величины геометрического угла выхода лопатки РК, формы меридиональных обводов проточной части и величины геометрического угла лопатки на входе в ЛД, а также различных вариантов исполнения диффузора ступени.

На основании выполненного детального анализа предложено усовершенствование геометрических параметров трех ступеней ЦБН с целью повышения их основных параметров. Ступень «А» усовершенствована путем изменения формы средней линии, а также величины конструктивного угла лопатки на выходе из РК, что привело к увеличению коэффициента политропического напора и расширению рабочей зоны характеристики нагнетателя. Модернизация ступени «Б» заключалась в коррекции формы меридиональных обводов проточной части и величины конструктивного угла лопатки на входе в ЛД, что привело к улучшению согласования работы РК и ЛД. После проведения расчетов ряда вариантов проточной части ступени «В», отличающихся используемым диффузором и шириной проточной части, были даны рекомендации по совершенствованию суммарных характеристик ступени, что привело к увеличению коэффициента политропического напора и КПД.

Ключевые слова: центробежный нагнетатель, метод поверочного расчета, структура осесимметричного дозвукового течения, учет вязких эффектов, суммарные характеристики, модификация геометрических параметров.

Fesenko K.V. Calculation and Theoretical Studies Method of Centrifugal Blower Stages Flow Structure and Characteristics. – The manuscript.

Thesis for scientific degree of the Candidate of Sciences (Engineering) on the specialty 05.05.16 – Turbomachinery and Turboplants. – National Technical University "Kharkiv Politechnical Institute", Kharkov, 2015.

The calculation and theoretical studies method of flow structure and characteristics of centrifugal blowers stages with impellers radial vanes was created. It allows determining summary characteristics and 2D flow structure of flow path including blade-to-blade channels in wide range of working regimes. To account for viscous effects generalized semi-empirical dependences for centrifugal blowers were used. The proposed method allows taking into account the geometric features of radial impeller with blades that formed by cylindrical and conical surfaces, vaneless and vaned diffusers, reverse guide vanes and

gas-path curvilinear contours.

The software package AxCB was developed, which allows carrying out the verification of the calculation method. It showed satisfactory accuracy of flow numerical investigation results in the stages with experimental and analytical data.

With the proposed method and software package AxCB studies were undertaken which dealt with influence of different geometric parameters of flow path and blade rows on the flow structure and stages summary characteristics. On the basis of a detailed analysis modernization of three centrifugal blower stages was proposed to improve their basic parameters or expand the characteristic working area.

Keywords: centrifugal blower, verification method, axisymmetric subsonic flow structure, viscous effects accounting, summary characteristics, geometrical parameters modification.