

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Неня Анна Вікторівна

УДК 621.67

ОСОБЛИВОСТІ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ
ПРОМІЖНОГО СТУПЕНЯ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидат технічних наук

Суми – 2008

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук
Євтушенко Анатолій Олександрович,
Сумський державний університет,
професор кафедри прикладної гідроаеромеханіки

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Сьомін Дмитро Олександрович,
Східноукраїнський національний
університет імені В.Даля,
професор кафедри гідрогазодинаміки;

кандидат технічних наук
Сухоребрий Петро Миколайович,
Інститут проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
старший науковий співробітник
відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин

Захист відбудеться 20 лютого 2009 р. о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
К55.051.03 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського –
Корсакова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Сумського державного університету
(м. Суми, вул. Римського- Корсакова, 2).

Автореферат розісланий « 19 » січня 2008 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є.М. Савченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Проблема росту дефіциту електроенергії, яка сьогодні спостерігається в країні, може бути вирішена шляхом розвитку енергозбереження, а саме підвищенням показників ефективності використання енергії. Насосне обладнання різних технологічних галузей є найбільш значущим споживачем електроенергії в промисловості. За існуючими даними насосним обладнанням споживається до 20% електроенергії, що виробляється. Таким чином, наряду зі створенням нових, більш досконалих відцентрових насосів, як найбільш розповсюдженого типу насосного обладнання, актуальною є їх модернізація з метою підвищення енергоефективності в роботі.

На сучасному етапі розвитку насособудування все більшого поширення набуває застосування блочно-модульного підходу до проектування насосів гідродинамічного принципу дії, що потребує свого науково - методичного забезпечення. Даний підхід передбачає формування конструктивної схеми насоса із типових елементів, склад і кількість яких обирається з умови забезпечення вимог технічного завдання на проектування, і, як наслідок, скорочення кількості конструктивних виконань насосних агрегатів для підвищення серійності виробництва останніх. Блочно-модульний підхід є найбільш економічним та швидким способом виробництва, оскільки передбачає використання готових відпрацьованих елементів. Якщо використання наявних елементів не вдається забезпечити вимоги технічного завдання, то з'ясовується «слабка ланка» і необхідно спроектувати і виготовити новий елемент із заданими параметрами. Для створення типорозмірного ряду окремих елементів проточної частини (ПЧ) необхідно вибрати критерії прийняття проектних рішень.

Як правило, під час проектування гідродинамічних насосів розраховуються характеристики та параметри окремих елементів ПЧ. При побудові моделі робочого процесу гідродинамічних насосів потрібно враховувати вплив структури течії, сформованої на виході з елементів ПЧ на роботу один одного.

У багатоступеневих насосах відвідні пристрої (відводи робочого колеса, що входять до складу проміжних ступенів) забезпечують перетворення реальної течії рідини за робочим колесом у вісесіметричну, тим самим створюючи умови для сталої течії в колесі наступного ступеня, змінюють момент швидкості потоку рідини та перетворюють кінетичну енергію потоку, що виходить з колеса, в енергію тиску та підводять рідину до вихідного патрубку. Багатоступеневі насоси, зазвичай, мають лопатеві відводи – напрямні апарати. В таких насосах відвід рідини від робочого колеса попереднього ступеня та її підвід до робочого колеса наступного ступеня об'єднані. Тому до апаратів такого типу висувають додаткову умову забезпечення прийнятної структури течії на вході в робоче колесо наступного ступеня. Незалежно від типу напрямного

апарату (НА), робота останнього має великий вплив на роботу насоса в цілому та його показники якості. Для насосних ступенів з коефіцієнтом швидкохідності $n_s < 110$, від пропускної здатності спіральної ділянки НА залежать втрати в ступені при різних режимах роботи насоса. Можна стверджувати, що місцеположення оптимального режиму роботи ступеня залежить від роботи НА.

Зв'язок програми з науковими темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету відповідно до науково-технічної програми Міністерства освіти і науки України та реалізована при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт (замовник Міністерство освіти і науки України): «Наукові основи технічного забезпечення енергозберігаючих технологій в гідропневмосистемах» (№ держреєстрації 0103U000769, підрозділ 1.2), «Дослідження нетрадиційних шляхів перетворення енергії в рідинах і газах та створення на їх основі прогресивного обладнання для гідропневмосистем» (№ держреєстрації 0106U001935, підрозділ 3.2, пункт 4.5.2), а також в рамках госпдоговірної роботи СумДУ (замовник ВАТ «Лівгідромаш»): «Разработка теоретических чертежей рабочих органов к насосу ЦНС 180», контракт №80.13.71.06 від 01.08.2006 р.

Мета дослідження. Проведення аналізу робочого процесу напрямних апаратів багатоступеневих відцентрових насосів з метою визначення кількісних безрозмірних критеріїв для забезпечення можливості оптимізації їх конструкцій за якістю сформованої структури течії на виході з робочого колеса (РК) в умовах блочно-модульного проектування.

Основні задачі дослідження:

- 1) визначити особливості структури течії на виході з робочого колеса багатоступеневого відцентрового насоса;
- 2) визначити характер впливу нерівномірної структури течії за робочим колесом на роботу прямого апарата та проміжного ступеня в цілому;
- 3) визначити шляхи вдосконалення геометрії НА з урахуванням особливостей структури течії за відцентровим РК насоса;
- 4) розробити наукове обґрунтування виділення прямого (відвідного) апарату в окремий модуль ПЧ багатоступеневого відцентрового насоса для здійснення переходу до блочно-модульного проектування ПЧ насосів з метою покращення показників виробництва.

Об'єкт дослідження – робочий процес проміжного ступеня багатоступеневих відцентрових насосів.

Предмет дослідження - структура течії між РК та НА, критерії оцінювання НА та функціональний зв'язок між ними.

Методи дослідження. Поставлені задачі дослідження вирішувались методами математичного та фізичного моделювання. Модель робочого процесу формується на основі

законів збереження та руху, які є фундаментальними в технічній гідродинаміці. По-перше, в інтегральному вигляді вони використані для аналізу параметрів у контрольних перерізах. По-друге, диференціальна форма покладена в основу програмного засобу для ведення розрахункового експерименту, шляхом її відповідної дискретизації та алгебраїзації. ПЧ ступеня відцентрового насоса (ВЦН) та НА, як її елементу, розглядаються як система, що складається з взаємозв'язаних між собою елементів. При цьому кожний рівень моделі характеризується єдиним підходом до вирішення завдання критеріального аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Проведено аналіз структури течії за РК, в результаті якого визначено наступні особливості: картина течії нерівномірна, ця нерівномірність зумовлена нерівномірністю колової складової швидкості; вказані особливості не залежать від розмірів відцентрових РК на виході, а визначаються формою меридіанного перерізу та кутом установки лопаті на виході.

2. Науково обґрунтовано можливість поелементного розрахунку ПЧ відцентрових насосів.

3. Отримано критеріальні рівняння для робочого процесу відвідних пристроїв ВЦН, що дозволяє врахувати нерівномірність розподілу гідродинамічних параметрів у вхідному перерізі відвідного пристрою.

4. Проведено системний аналіз ступеня ВЦН на стадії компоновки останнього з окремих елементів з урахуванням нерівномірного розподілу гідродинамічних параметрів на виході з РК.

Практичне значення:

1. Проведено розрахункове дослідження впливу нерівномірної структури течії у зазорі між РК та НА, з урахуванням чого видані практичні рекомендації щодо модернізації геометрії вхідних ділянок НА, які теоретично встановлені та експериментально перевірені.

2. Визначено безрозмірні критерії оцінки роботи НА та взаємозв'язок між ними, що дозволяє розробити обґрунтовану методику проектування НА з урахуванням взаємодії усіх його елементів та мінімізації сумарних втрат у НА.

3. Використання рівнянь у критеріальному вигляді дозволяє виконувати кількісний аналіз і тим самим значно підвищити якість проектування НА в рамках переходу до блочно-модульного проектування ПЧ відцентрових насосів на стадії проектування.

4. Доповнено методику проектування каналного НА ВЦН як найбільш гідравлічно досконалого та розповсюдженого.

Основні результати дослідження були впроваджені в навчальний процес СумДУ при викладанні дисциплін «Гідравлічні машини та передачі», «Моделювання та оптимізація гідропневмосистем» та «Системи автоматизованого проектування гідравлічних машин» для студентів спеціальності 05.05.17 «Гідравлічні та пневматичні машини», що підтверджується наведеними в дисертації актами впровадження.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. В роботах, що опубліковані у співавторстві, здобувачем виконано: аналіз наявної класифікації вихрових течій та застосування останніх в насосах різного призначення [1], визначені загальні питання вивчення взаємного впливу роботи окремих елементів ПЧ на роботу один одного та насоса в цілому [2], наведені результати розрахункового експерименту по вивченню структури течії рідини за робочим колесом відцентрового ступеня [3], методика оптимізаційних заходів щодо модернізації робочих органів ПЧ ВЦН [4], наведені результати визначення картини течії та інтегральні показники ступеня з НА нової конструкції вхідних ділянок [5], отримання безрозмірних критеріїв та зв'язку між ними для НА багатоступеневих ВЦН [6].

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на:

X – XII Міжнародних науково - технічних конференціях «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці» (м. Краматорськ, 2005 р., м.Київ, 2006 р., м. Луганськ, 2007 р.);

VII - IX науково - технічних конференціях «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Вінниця, 2006 р., м. Мелітополь, 2007 р., м. Кременчук, 2008 р.);

Міжнародній науково - технічній конференції «Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (м. Харків, 2006 р.);

на науково - технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів СумДУ (щорічно з 2005 по 2008 рр.).

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи відображено в 6 статтях у фахових виданнях з переліку, затвердженого ВАК України. Матеріали дисертаційної роботи використовувались у звітах з НДР.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 114 сторінок. Дисертаційна робота містить 51 рисунок, з яких 17 рисунків на окремих сторінках, 4 таблиці по тексту, 3 додатки на 12 сторінках, список використаних літературних джерел із 123 найменувань на 15 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі було обґрунтовано доцільність і актуальність вивчення питання підвищення ефективності робочого процесу ПЧ ступеня ВЦН шляхом врахування взаємодії усіх її елементів. Сформульована мета і задачі дослідження. Наведено основну інформацію про апробації роботи, публікації і структуру дисертації.

У першому розділі викладені результати інформаційно-аналітичного огляду сучасного стану проблеми, пов'язаної з дослідженнями робочого процесу ПЧ ВЦН.

В умовах поширеного використання насосного обладнання в різних технологічних галузях все більше постає проблема нерентабельності виробництва останніх. Для забезпечення необхідних параметрів потрібна велика кількість різних насосів за умови невеликої потреби у кожному зокрема. Шляхи вирішення цієї проблеми приводять нас до блочно-модульного принципу проектування.

Даний підхід передбачає формування конструктивної схеми насоса з типових елементів, склад і кількість яких обирається з умови забезпечення вимог технічного завдання на проектування, і, як наслідок, скорочення кількості конструктивних виконань складових насосних агрегатів для підвищення серійності виробництва останніх.

У багатоступеневих насосах лопатеві відводи (НА) забезпечують перетворення реальної течії рідини за РК у вісесіметричну, тим самим створюючи умови для сталої течії в колесі наступного ступеня, змінюють момент швидкості потоку рідини та перетворюють кінетичну енергію потоку, що виходить з колеса, в енергію тиску та підводять рідину до РК, забезпечуючи прийнятну структуру течії. Незалежно від типу НА, робота останнього має великий вплив на роботу насоса в цілому та його показники якості.

По дослідженню структури течії за РК ВЦН є експериментальні дані. Серед них слід виділити роботи А.І. Тімшина, С.А. Горгіджянця та В.Г. Іванова. Вказані роботи проводилися на аеростендах з використанням зондів для вимірювання параметрів течії. Основним висновком з аналізу результатів робіт, які не суперечать загальним даним, є наявність нерівномірної структури течії за відцентровим колесом. Особливістю такої структури є значна нерівномірність за шириною колеса кутів течії та абсолютних швидкостей на виході з останнього. Заміри проводились в перерізі при відносному радіусі 1,032. Радіус контрольного перерізу знаходиться в рекомендованих межах відношення діаметрів відводу та РК 1,02 - 1,05.

Традиційно ПЧ розглядається як єдине ціле, її якість визначається загальними інтегральними показниками. Підвід, РК та НА, як окремий випадок відводу, є блоками ПЧ насоса. В рамках цього підходу їх потрібно розглядати також як і окремі самостійні елементи, одночасно враховуючи взаємний вплив на роботу один одного через сформовану структуру течії у граничних перерізах між ними. Для створення типорозмірного ряду окремих елементів ПЧ необхідно обрати критерії прийняття проектних рішень. Стосовно підвідних пристроїв вперше О.В. Вертячих навів ряд критеріальних параметрів, зазначив зв'язок між ними. Щодо відвідних пристроїв за результатами літературного огляду інформації не було знайдено

У другому розділі визначені завдання, що вирішувались для досягнення мети дослідження. Описані методи та засоби дослідження.

Наведені у загальній характеристиці мета та задачі дослідження для її вирішення передбачали великий обсяг робіт різного змісту і призначення, тому було обрано розрахунково-теоретичний спосіб досліджень з наступною перевіркою основних результатів фізичним експериментом.

Задачами експериментальних досліджень було:

- визначення особливостей структури течії на виході з РК ВЦН у діапазоні коефіцієнта швидкохідності $n_s = 69-100$, а саме розподіл кутів виходу течії й абсолютних швидкостей течії, її колових та меридіанних складових у вихідному перерізі відцентрових коліс;
- проведення критеріального аналізу НА з метою визначення безрозмірних критеріїв оцінки роботи НА з урахуванням реальної структури течії, сформованої у вхідному перерізі апарату;
- отримання інтегральних характеристик проміжного ступеня, спроектованого з урахуванням взаємодії елементів ПЧ на роботу один одного.

Дослідження проведено на реальних об'єктах. Фізичні моделі робочих органів – РК та каналного НА (рис. 1) ВЦН – мають фактичні розміри, що виключило перерахунок експериментально встановлених гідродинамічних параметрів з моделі на натуру та пов'язаних з цим додаткових похибок.

Експериментальний стенд виробничого підприємства ВАТ «Лівгідромаш» із замкнутою схемою циркуляції рідини, містив установку, що дозволяє проводити випробування як експериментальних, так і дослідних ПЧ ВЦН у діапазоні зміни витрат від 50 до 400 м³/год. Вимірювальні пристрої, що використовувалися на експериментальному стенді, пройшли атестацію та перевірку у встановленому порядку.



Рис. 1 Проточна частина досліджуваного насоса:

а) РК; б) каналний НА

Методика проведення випробувань і визначення енергетичних характеристик експериментальних ступенів загальноприйнята та відповідає вимогам ДСТУ 6134 - 87. На стенді

використовувались тільки взірцеві прилади (класа точності не нижче 0,4). Витримані усі вимоги на їх установку та використання. Розрахунки похибок непрямих вимірювань свідчать, що приладне забезпечення та методика експериментального дослідження забезпечує отримання достовірних даних з припустимою точністю для газодинамічних досліджень, встановлених діючим стандартом.

В результаті аналізу апробованих та опублікованих результатів розрахунків течій рідини та газу з застосуванням сучасних програмних засобів методом розрахункового дослідження було обрано моделювання течії рідини у ПЧ за допомогою програмного продукту ANSYS CFX 10.0, блоку моделювання турбомашин. Оскільки результати досліджень практично призначені для насосів загальнопромислового використання, котрі перекачують рідини, за властивостями та складом подібними до технічно чистої води, в якості вихідної математичної моделі обрані рівняння нерозривності та повні рівняння Рейнольдса. До складу цих рівнянь входять складові масових, інерційних та конвективних сил та сил тиску, в'язкої дисипації. Рівняння використовуються у диференційній формі. Густина рідини приймається сталою.

Течія в робочих органах, що обертаються, розглядається у відносній системі відліку, при цьому масові сили у рівняннях Рейнольдса визначають дію відцентрових сил та сил Кориоліса.

Оскільки на кромках лопатей РК та НА турбулентність генерується у крупні когерентні структури, а далі у каналах розбивається на мікомаштабні вихроутворення, вирівнюючи розподіл швидкостей до вхідної ділянки, для замикання рівнянь використані типові $k-\epsilon$ та $RNG-\epsilon$ моделі турбулентності та модель SST (модель переносу зсувних напружень). При використанні даних моделей турбулентності система рівнянь руху рідини доповнюється рівняннями, які описують перенос кінетичної енергії турбулентності, частоту турбулентних пульсацій та швидкості дисипації.

В якості чисельного методу застосовується метод кінцевих об'ємів, основна ідея якого полягає у дискретизації розрахункової області на N – у кількість контрольних об'ємів, що не перетинаються, таким чином, що кожна вузлова точка належить одному контрольному об'єму. Диференційне рівняння інтегрують по кожному контрольному об'єму. Для обчислення інтегралів застосовують кусочно - неперервні функції. Останні описують зміну залежної величини між сіточними вузлами. Однією з важливих властивостей методу є закладене точне інтегральне збереження таких величин, як кількість руху, маса та енергія на будь-якій групі контрольних об'ємів, а останнє означає, що й на всій розрахунковій області. Наведені дані зумовлюють отримання достовірних результатів математичного моделювання робочого процесу проміжного ступеня багатоступеневого ВЦН.

Математичне моделювання течії дозволяє отримати характерні розподіли гідродинамічних параметрів течії у контрольних перерізах.

Теоретичне дослідження використовує методи, засновані виключно на фундаментальних законах гідромеханіки: закон збереження енергії у вигляді рівняння Бернуллі для в'язкої рідини та закон збереження маси у вигляді рівняння нерозривності робочого середовища, виконані строго математично та практично забезпечені. Останнє забезпечує обґрунтованість результатів теоретичного дослідження.

У третьому розділі наведені результати розрахункового моделювання течії рідини у РК та проміжних ступенях ВЦН з метою вивчення особливостей структури течії в зазорі між РК та НА та виявлення взаємного впливу на роботу один одного елементів ПЧ ВЦН та теоретичне дослідження виділення НА як окремого блоку ПЧ ВЦН та окремих ділянок НА, визначення безрозмірних критеріїв для оцінки роботи останніх.

Чисельний експеримент з визначення структури течії рідини за РК проводився для відцентрових РК у діапазоні швидкохідності $n_s = 69 - 100$ з розмірами, формами меридіанного перерізу, що є характерним для багатоступеневих ВЦН, та різними кутами виходу, характерні з яких зазначені у таблиці 1. Для створення однакових умов при визначенні структури досліджувалися робочі колеса зі встановленими за ними безлопатевими дифузорами. Розрахункова модель наведена на рис. 2.

В якості граничних умов задавалися: умова прилипання на всіх твердих стінках (швидкість дорівнює нулю), розподіл всіх складових швидкості у вхідному перерізі, масова витрата G_i (i – кількість каналів РК) через один канал РК, на виході – повний статичний тиск p_0 (оскільки тиск входить до рівняння лише у вигляді перших похідних, зазначаємо його значення лише на одній границі). Тип граничної умови на виході задається таким, щоб визначити можливість моделювання наявності зворотних струмів (має назву «opening», тобто відкрита границя).

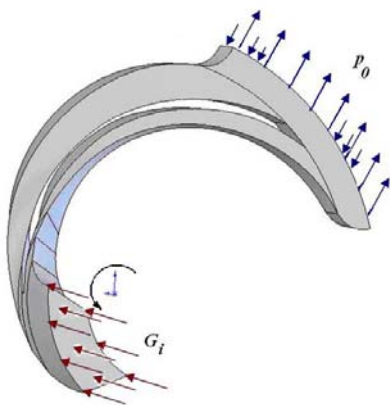


Рис. 2 Розрахункова модель каналу досліджуваних РК

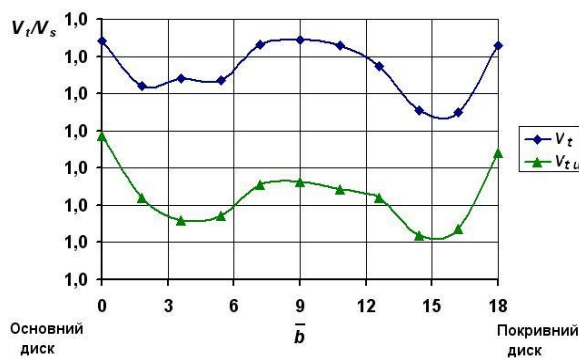
Таблиця 1
Параметри досліджуваних робочих коліс

РК	РК №1	РК №2	РК №3
n_s	100	90	69
D_2 , мм	500	300	360
b_2/D_2	0,062	0,06	0,05
d_{em}/D_2	0,572	0,353	0,272
$\beta_{2л}$, град	20	27	28
z	7	7	8

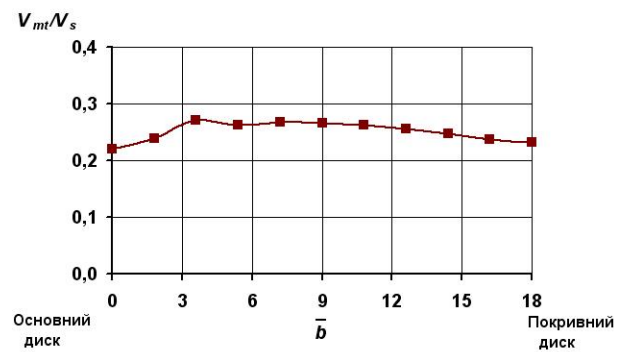
Структура течії в абсолютному русі на виході для РК№3 показана на рис. 3 у вигляді безрозмірних осереднених величин, віднесених до величини, осередненої за всією площею контрольного перерізу. Наведені результати стосуються оптимального режиму за витратою. Параметри течії визначались у контрольному перерізі на відстані $\bar{r} = r/r_2 = 1,01$. З графіків видно, що меридіанна складова змінюється достатньо рівномірно за шириною РК.

Істотною нерівномірністю відзначається розподіл за шириною колеса колової складової абсолютної швидкості та абсолютної швидкості течії рідини за РК. Треба відмітити зменшення величини швидкостей, як абсолютної, так і колової приблизно на 1 – 2 %, а меридіанної – на 15 – 20 % біля покривного диску у порівнянні з відповідними величинами біля основного диску РК. Характер зміни кута виходу течії з РК ідентичний до розподілу меридіанної складової швидкості (рис. 3, б). Аналогічну картину течії маємо й на виході з РК№2.

Причиною нерівномірної структури течії за РК визнаємо колову нерівномірність. В свою чергу остання не залежить від коефіцієнта швидкохідності і виникає як наслідок форми меридіанного перерізу колеса та кута установки лопаті на виході з колеса.



а)



б)

Рис. 3 Характер зміни безрозмірної абсолютної швидкості течії V_t , її колової складової $V_{t\theta}$ (а) та меридіанної складової $V_{m\theta}$ (б), осереднених за кроком лопатей, за шириною колеса; V_s – абсолютна швидкість, осереднена за всім контрольним перерізом; $\bar{b} = b/b_2$ - відносна ширина колеса

З метою визначення впливу нерівномірної структури течії за РК на роботу НА та ступеня було досліджено два проміжних ступеня ВЦН, параметри яких наведені у таблиці 2. Розрахункова модель наведена на рис. 4.

При врахуванні характерних особливостей розподілу складових швидкості та кутів виходу течії з РК, поліпшувалась картина натікання течії на вхідну ділянку лопаток НА, що зменшувало втрати на удар та покращувало структуру течії в інших досліджуваних перерізах НА, внаслідок

чого підвищувались показники енергоефективності робочого процесу ступеня (на оптимальному режимі ККД збільшився на 0,1%, на режимах перевантаження – на 3%). При встановленні за РК каналного НА, показники якості роботи РК, як окремого елемента ПЧ, також підвищувалися.

Таблиця 2

Параметри досліджуваних ступенів

Параметри ступенів	ПС №2	ПС №3
n_s	90	69
D_3/D_2	1,003	1,01
b_3/b_2	1,33	1,22
z_{pk}	7	8
$z_{на}$	6	6

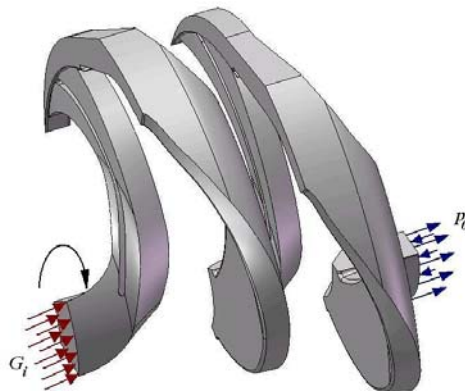


Рис. 4 Розрахункова модель досліджуваного проміжного ступеня

Для проведення критеріального аналізу каналного НА, як найбільш розповсюдженого та гідравлічно досконалого для ВЦН, використано рівняння закону збереження енергії при квазістаціонарному русі в'язкої рідини в нерухомих елементах насоса. Для квазістаціонарної течії рідини кожен з функцій, що описує гідродинамічні параметри, будемо представляти як суму середньої $\langle f \rangle$ та пульсаційної f' величин:

$$f(q_1, q_2, q_3) = \langle f(q_1, q_2) \rangle + f'(q_1, q_2, q_3, t), \quad (1)$$

де q_1, q_2, q_3 – координатні напрямки. Середню величину будемо визначати як звичайну інтегральну величину.

Осереднення енергії течії у вхідному перерізі НА виконувалось з урахуванням нерівномірності розподілу абсолютних швидкостей та тиску, що добре збігається з реальними даними. Зважаючи на функціональне призначення відводу у вихідному перерізі НА 6-6 (рис. 5) було прийнято рівномірну вісесиметричну структуру течії, для якої фактичні та середні значення співпадають, тобто для тиску та швидкості справедливі співвідношення $p_6 = \langle p_6 \rangle, V_6 = \langle V_6 \rangle$. Після осереднень енергії течії у контрольних перерізах НА та нескладних перетворень було отримано рівняння Бернуллі для нерівномірного потоку у вхідному перерізі НА:

$$\frac{\langle P_3 \rangle}{\gamma} + \frac{\langle V_3 \rangle^2}{2g} (1 + s_{pk}^2) = \frac{P_6}{\gamma} + \frac{V_6^2}{2g} + h_{emp}, \quad (2)$$

де s_{pk} - коефіцієнт нерівномірності течії на виході з РК:

$$s_{pk} = \frac{\sqrt{\langle V_3' \rangle^2}}{\langle V_3 \rangle^2}; \quad (3)$$

$h_{emp} = \frac{E_{emp}}{\rho g Q}$ - питома втрата енергії на одиницю ваги рідини.

Після приведення рівняння (2) до безрозмірного вигляду з врахуванням відповідності параметрів у вихідному перерізі НА 6-6 вхідному перерізу РК 0-0 (зокрема рівність швидкості $\langle V_6 \rangle = V_0$), було отримано рівняння, в яке ввійшли шість безрозмірних гідромеханічних та геометричних параметрів, котрі характеризують рух в'язкої рідини у НА ВЦН:

$$\lambda_a + n_a^2 (1 + 4\pi^2 m_{pk}^2) (1 + s_{pk}^2) = (1 + 4\pi^2 m_a^2) + \zeta_a. \quad (4)$$

До формули (4) входять: коефіцієнт втрат статичного тиску

$$\lambda_a = \frac{\langle P_3 \rangle - P_6}{\rho V_0^2 / 2}; \quad (5)$$

коефіцієнт конфузорності:

$$n_{на} = \frac{F_6}{F_3} = \frac{V_3}{V_0}; \quad (6)$$

коефіцієнт моменту швидкості на виході з РК та виході з НА відповідно:

$$m_{рк} = \frac{K_3 \cdot b_3}{Q}, \quad (7)$$

$$m_{на} = \frac{K_6 \cdot b_6}{Q}; \quad (8)$$

коефіцієнт втрат енергії рідини у НА (втрат повного тиску)

$$\zeta_a = \frac{h_{emp}}{V_0^2 / 2g}. \quad (9)$$

Системний аналіз застосовується при блочно-модульному проектуванні конструктивної схеми насоса в цілому. В тому випадку, коли з деяких причин наявні відводи не задовольняють необхідним вимогам, виникає потреба проектування нового відповідного пристрою. При цьому відвід розглядається як підсистема, що складається з елементів із більш детальним описом і до кожного з них застосовується критеріальний аналіз.

Незалежно від складності конструкції каналів можемо виділити наступні елементи НА: спіральну ділянку – по гідравлічним функціям та геометрії подібну до спірального відводу; дифузор – в якому безпосередньо відбувається перетворення кінетичної енергії течії в потенціальну; перевідні та зворотні канали – які направляють потік до РК наступного ступеня та формують рівномірну структуру течії на його

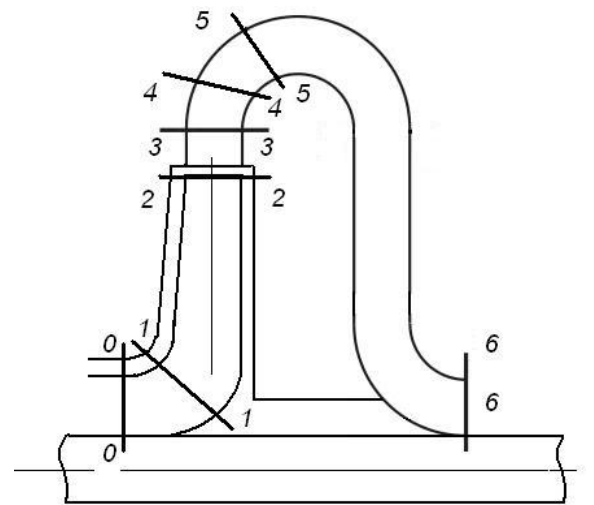


Рис.5 Конструктивна схема до критеріального аналізу НА

вході. Такий розподіл визначається структурою течії рідини та обґрунтований можливістю використання окремих елементів НА при формуванні різних конструктивних виконань відводів ВЦН. Для зазначених ділянок були отримані критеріальні рівняння за аналогічною методою.

Спіральна ділянка:

$$\lambda_{cn} + n_{cn}^2 \cdot \frac{\sin \alpha_4}{\sin \alpha_3} (1 + 4\pi^2 m_{pk}^2) (1 + s_{pk}^2) = (1 + s_{cn}^2) + \zeta_{cn}. \quad (10)$$

Дифузор:

$$\lambda_{dif} + n_{dif}^2 (1 + s_{cn}^2) = (1 + s_{dif}^2) + \zeta_{dif}. \quad (11)$$

Переводні та зворотні канали

$$\lambda_{зв} + k_{зв}^2 (1 + s_{dif}^2) = (1 + 4\pi^2 m_a^2) + \zeta_{зв}. \quad (12)$$

Коефіцієнти, визначені в рівняннях (10) – (12) мають вирази, відповідні до (3) та (5) – (9). Рівняння (4), (10) – (12) зв'язують між собою геометричні та гідродинамічні критерії подібності для досліджуваного елементу ПЧ ВЦН та його елементів блоку.

При проектуванні ВЦН необхідно сформуванати баланс енергії на виході із насоса таким чином, щоб складова, обумовлена тиском, була максимальною, а кінетична енергія мінімальною. З огляду на це у отриманих критеріальних рівняннях необхідно забезпечувати потрібні значення коефіцієнту перепаду статичного тиску та коефіцієнту дифузорності, інші коефіцієнти визначати за умови дотримання загального балансу енергії. Очевидно, що актуальною задачею є розробка таких елементів проточної частини, які б мали мінімальні значення як коефіцієнту втрат енергії, так і коефіцієнту нерівномірності поля швидкості у контрольних перерізах, оскільки ці складові знижують ефективність робочого процесу як у відвідних пристроях, так і насоса в цілому.

У четвертому розділі наведено результати експериментального дослідження ПЧ з визначення енергетичних характеристик та методика проектування НА з урахуванням нерівномірності розподілу гідродинамічних параметрів на вході в останній.

Для ПЧ ЦНС 180, спроектованої за замовленням ВАТ «Лівгідромаш», були отримані наступні значення критеріїв: $\lambda = -4,027$; $m_{pk} = 1,179$; $m_{na} = 0$; $s_{pk} = 0,868$; $\zeta = 4,271$; $n_{na} = 0,334$. На рис. 6 наведені інтегральні показники роботи проміжного ступеня з $n_s = 69$, отримані фізичним та

розрахунковим дослідом у порівнянні з вихідним ступенем (наведені дані фізичного дослідження).

Методика практичного застосування блочно-модульного проектування ПЧ ступеня ВЦН на підставі системного аналізу передбачає розгляд взаємодії усіх складових ступеня, їх взаємний вплив на роботу ступеня в цілому (рис. 7). Ступінь ВЦН, як система, включає крім РК та НА ще два ущільнення: по відношенню до РК переднє та заднє. Як найбільш розповсюджені приймаю щілинні.

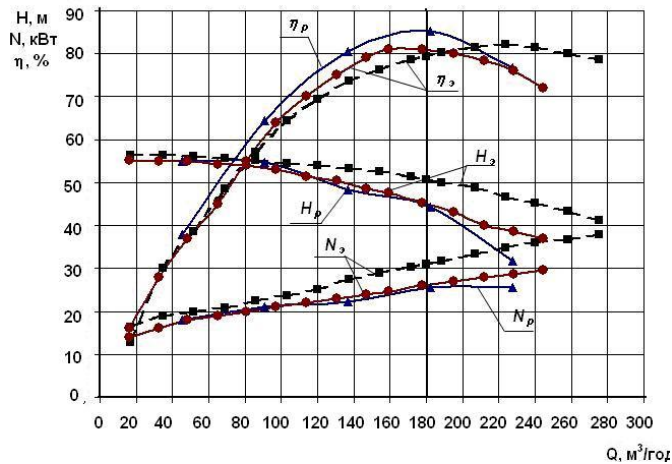


Рис. 6 Порівняльна характеристика результатів фізичного (індекс «е») та розрахункового (індекс «р») експериментів:
(- - -) дані вихідного ступеня; (—) та (—) дані нового ступеня

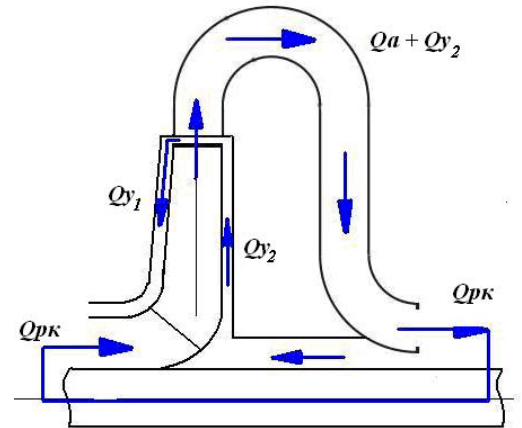


Рис. 7 Конструктивна схема до компоновки проточної частини з окремих блоків

Під час компоновки необхідно зберегти баланс енергії в ПЧ, який виражається через закон збереження маси:

$$Q_{рк} = Q_a + Q_{y1} + Q_{y2}, \quad (13)$$

де $Q_{рк}$ – витрата на вході в РК; Q_a – витрата через НА; Q_{y1} – витрата через переднє ущільнення $Q_{y1} = \mu_1 F_1 \sqrt{2g\Delta H_{y1}}$; Q_{y2} – витрата через заднє ущільнення $Q_{y2} = \mu_2 F_2 \sqrt{2g\Delta H_{y2}}$.

Рівняння, що характеризують РК, НА та ступінь відповідно мають вигляд:

$$H_{рк} = a_{рк} + b_{рк}Q + c_{рк}Q^2, \quad H_a = a_a + b_aQ + c_aQ^2; \quad (14)$$

$$H_{pk} = \Delta H_{вц} + \Delta H_{y1}, \quad H_a = \Delta h_a = \Delta H_{вц} + \Delta H_{y2}; \quad (15)$$

$$H_{ст} = H_{pk} - \Delta h_a = H_{pk} - \zeta_a \frac{V_0^2}{2g}, \quad (16)$$

де $\Delta H_{вц}$ – відцентрові втрати $\Delta H_{вц} = U_2^2 / 8g \left[1 - (r_y / r_2)^2 \right]$ (r_y – радіус ущільнення, r_2 – радіус виходу РК).

В результаті розв'язання системи рівнянь (13) – (16) отримуємо параметри ступеня у робочій точці, які може забезпечити скомпонований, як окремий модуль, проміжний ступінь. За умови не отримання прийнятного результату компоуємо ПЧ ступеня з інших елементів або застосовуємо немодельні зміни РК та НА.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої задачі підвищення ефективності проточних частин ВЦН за рахунок проектування напрямного апарату з урахуванням взаємодії усіх його елементів через сформовану структуру течії на виході з кожного та мінімізації втрат в ньому. Основі результати та висновки:

1. Традиційний розгляд ПЧ як одного цілого, і як наслідок, окреме проектування та виробництво кожного насоса, зумовлює нерентабельність проектування та виробництва насосів. В умовах широкого використання ВЦН виникає потреба великої кількості різних насосів для забезпечення необхідних параметрів за умови невеликої потреби в кожному з них зокрема. Блочно – модульний підхід передбачає формування конструктивної схеми насоса із типових елементів, склад і кількість яких вибирається з умови забезпечення вимог технічного завдання на проектування, і, як наслідок, скорочення кількості конструктивних виконань насосних агрегатів для підвищення серійності виробництва останніх.

2. Проведений аналіз літературних джерел, присвячених дослідженням течії рідини в ПЧ ВЦН, показав наявність значної нерівномірності розподілу кутів виходу течії та абсолютних швидкостей на виході з РК за шириною колеса. Ця нерівномірність зумовлена робочим процесом ВЦН і повинна буди врахована при проектуванні НА насоса.

3. Проведено співставлення даних розрахункового та фізичного експериментів за дослідженням робочого процесу в РК ВЦН, що підтвердило адекватність комп'ютерної моделі РК та можливість застосування математичного моделювання за допомогою програмних засобів на стадії проектування ПЧ лопатевих насосів.

4. За допомогою розрахункового дослідження були виявлені особливості, характерні для РК ВЦН, розподілу гідродинамічних параметрів течії рідини за РК, що дозволило визначити граничні умови у вхідному перерізі НА, як самостійного елементу ПЧ в рамках блочно-модульного проектування. Виявлена картина течії є нерівномірною, що зумовлено нерівномірністю розподілу колової складової абсолютної швидкості. Нерівномірність розподілу гідродинамічних параметрів течії майже вирівнюється лише на відстані $r/r_2 = 1,08$ від вихідної кромки РК. Існуючі рекомендації щодо вибору геометрії вхідних ділянок НА дають нам значення $D_3/D_2 = 1,02 - 1,05$. З огляду на це при конструюванні вхідних ділянок НА необхідно враховувати вплив нерівномірності структури течії, сформованої на виході з РК, на роботу НА, а значить і ПЧ.

5. Проведений критеріальний аналіз окремих ділянок НА та НА в цілому дозволив визначити безрозмірні критерії оцінки якості роботи та зазначити функціональний зв'язок між ними, на основі чого доповнена і розширена методика кількісного аналізу НА з урахуванням взаємодії окремих його елементів та з РК на стадії проектування нових конструктивних виконань та аналізу роботи існуючих.

6. Застосування розроблених рекомендацій до проектування НА дозволило підвищити показники енергоефективності ПЧ ВЦН. Для проміжного ступеня ВЦН 180 з коефіцієнтом швидкохідності $n_s = 69$ було отримано підвищення к.к.д. в робочій точці на 2,5%.

7. Застосування методики чисельного моделювання впливу роботи РК на роботу НА та проміжного ступеня загалом дозволило запропонувати вдосконалену геометрію вхідних ділянок НА ВЦН.

8. Результати дисертаційного дослідження впроваджені на виробництві ВАТ «Лівгідромаш» та у навчальному процесі СумДУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Евтушенко А.А., Неня А.В. Деление вихревых течений на составляющие и их использование в насосостроении. – Харьков : Издат- во ИпМаш, 2006 г. – №4, т. 9. – С. 58 - 64.
2. Евтушенко А.А., Карапузова М.В., Неня А.В. Результаты определения характеристики рабочего колеса как самостоятельного элемента центробежного насоса. Всеукраинский научно-технический журнал Промышленная гидравлика и пневматика. – Вінниця : Вид-во ВДАУ, 2007г. – №2 (16). – С. 40 – 43.
3. Євтушенко А.О., Карапузова М.В., Неня А.В. Вплив структури течії між основними елементами проточної частини на показники якості лопатевого насосу. Вісник СумДУ. – Суми : СумДУ, 2007 р. – №1. – С. 28 – 35. – (Технічні науки).
4. Евтушенко А.О., Луговая С.О., Неня А.В. Оптимизация геометрии проточной части насосной ступени с использованием результатов расчетного эксперимента. Вестник

Востоchnoукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганск, 2007 г. – №3 (109), ч.2. – С. 174 - 180.

5. С.О. Луговая, А.В. Неня, И.Б. Твердохлеб. Расчет усовершенствованных направляющих аппаратов многоступенчатых лопастных насосов. Всеукраїнський науково – технічний журнал Промислова гідравліка та пневматика. – Вінниця : Вид- во ВДАУ, 2008 г. – №2 (20). – С. 36 - 40.

6. Вертячих О.В., Карапузова М.В., Неня В.Г., Неня А.В. Гідродинамічні аспекти блочно-модульного конструювання проточних частин насосів гідродинамічного принципу дії на ділянці «вихід з робочого колеса – вхід у відвід» Вісник Національного технічного університету України «КПІ» К.: НТУУ «КПІ». – 2007 г. – № 54. – С. 25 - 33.

АНОТАЦІЯ

Неня А.В. «Особливості робочого процесу проміжного ступеня багатоступеневого відцентрового насоса».- Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. - Сумський державний університет, Суми, 2008 р.

З метою удосконалення показників якості роботи проміжного ступеня відцентрового насоса проведені дослідження з виявлення особливостей структури течії в зазорі між робочим колесом і напрямним апаратом та критеріальний аналіз напрямних апаратів для забезпечення можливості оптимізації їх конструкцій за якістю сформованої структури течії на вході в останні в умовах блочно-модульного проектування. Математична модель течії базується на основі законів збереження та руху для нестисненої рідини, $k - \epsilon$ моделі турбулентності. Математична модель дозволяє розрахувати поле розподілу гідродинамічних параметрів течії в проточній частині насоса.

Отримані результати з вивчення структури течії виявили значну нерівномірність розподілу абсолютної швидкості та кута виходу течії з робочого колеса та визначний вплив нерівномірного розподілу колової складової швидкості. Структура течії визначається формою меридіанного перерізу та кутом установки лопаті на виході колеса. Проведений критеріальний аналіз напрямного апарату дозволив визначити безрозмірні критерії оцінки якості роботи.

Експериментально отримані робочі характеристики проміжних ступенів відцентрового насоса з напрямними апаратами традиційної та вдосконаленої форми вхідної ділянки останнього. На основі отриманих результатів доповнена і розширена методика розрахунку напрямного апарату з урахуванням взаємодії його з робочим колесом.

Ключові слова: відцентровий насос, робоче колесо, напрямний апарат, структура течії, нерівномірність, математична модель, гідродинамічні параметри, безрозмірні критерії, енергетичні характеристики.

АННОТАЦІЯ

Неня А.В. «Особенности рабочего процесса промежуточной ступени центробежного насоса».- Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты.- Сумский государственный университет, Сумы, 2008 г.

С целью усовершенствования показателей качества работы промежуточной ступени центробежного насоса проведены исследования по определению особенностей структуры течения в зазоре между рабочим колесом и направляющим аппаратом и критериальный анализ направляющих аппаратов для обеспечения возможности оптимизации их конструкций по качеству сформированной структуры течения на входе в условиях блочно-модульного проектирования. Математическая модель течения создана на основе законов сохранения и движения для несжимаемой жидкости, $k - \epsilon$ модели турбулентности. Проточная часть лопастного насоса и направляющий аппарат, как элемент проточной части, рассматриваются как система, состоящая из взаимосвязанных элементов. При этом каждый уровень модели характеризуется единым подходом к решению задачи критериального анализа. Математическая модель позволяет рассчитать поле распределения гидродинамических параметров течения в проточной части насоса.

Полученные результаты по изучению структуры течения определили значительную неравномерность распределения абсолютной скорости и угла выхода потока из рабочего колеса и определяющие влияние неравномерного распределения окружной составляющей скорости. Структура течения определяется формой меридианного сечения и углом установки лопасти на выходе колеса. Выполненный критериальный анализ направляющего аппарата и его отдельных участков позволил выделить безразмерные критерии оценки качества работы. Полученная функциональная связь между ними указывает на определяющее влияние неравномерности течения, которая выходит из рабочего колеса.

Экспериментально получены рабочие характеристики промежуточных ступеней с направляющим аппаратом традиционной и усовершенствованной формы входного участка. На основе полученных результатов дополнена и расширена методика количественного анализа и расчета лопаточного направляющего аппарата с учетом взаимодействия отдельных его элементов и с рабочим колесом на стадии проектирования новых конструктивных исполнений.

Ключевые слова: центробежный насос, рабочее колесо, направляющий аппарата, структура течения, неравномерность, математическая модель, гидродинамические параметры, безразмерные критерии, энергетические характеристики.

SUMMARY

Nenya A.V. Features of the working process of an intermediate stage of a radial-flow pump.- The manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science in speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydraulic and pneumatic units.- Sumy State University, Sumy, 2008.

In order to improve the parameters of operation quality of an intermediate stage of an radial-flow pump, features of the flow structure in the clearance between the impeller and the guiding device was researched as well as the criterion analysis of the guiding devices was made. The purpose was to enable optimization of their design by the quality of the generated flow structure at the inlet under the conditions of block-module designing. The mathematical model of the flow is based on the laws of conservation and movement for an incompressible fluid, $k - \varepsilon$ turbulence model. The mathematical model allows to calculate a field of hydrodynamic parameters of flow in the flow passage of the pump.

The obtained results of studying the flow structure have shown significant non-uniformity of distribution of the absolute speed and the flow angle at the impeller outlet as well as dominating influence of non-uniform distribution of the circumferential component of velocity. The flow structure is determined by the shape of the meridian cross-section and the angle of blade installation at the impeller outlet. The performed criterion analysis of the guiding device has allowed to specify dimensionless criteria for estimation its operation quality.

The performance characteristics of intermediate stages with a guiding device of traditional and improved design of the entrance section are obtained experimentally. Basing on the obtained results, the method of the calculation of the guiding vanes taking into account the interaction with the impeller at the stage of designing of new modifications is added and extended.

Keywords: radial-flow pump, impeller, guiding device, flow structure, non-uniformity, mathematical model, hydrodynamic parameters, dimensionless criteria, performance characteristics.

Підписано до друку 25.12.2008.
Наклад 100пр.
Замовлення № 7

Формат 60х90/16.
Обл.-вид.арк. 0,8.
Ум. друк. арк. 1,1.

Папір офсетний.
Гарнітура
Times New Roman Суг. Друк офсетний.

Видавництво СумДУ. Свідоцтво №3062 від 17.12.2007 р.
40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.
Друкарня СумДУ, 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.