

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Папченко Андрій Анатолійович**

УДК 621.662-592.2

**ГІДРОДИНАМІКА РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ТЕПЛОГЕНЕРУЮЧОГО АГРЕГАТУ  
БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми - 2006

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Сумському державному університеті

Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник -** доктор технічних наук, професор  
**Волков Микола Іванович**,  
Сумський державний університет.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Гнесін Віталій Ісайович**,  
Інститут проблем машинобудування НАН України,  
зав. відділу аерогідромеханіки;

кандидат технічних наук, доцент  
**Турик Володимир Миколайович**,  
Національний технічний університет України  
”Київський політехнічний інститут”,  
доцент кафедри гідропневмоавтоматики і гідравліки.

**Провідна установа -** Національний технічний університет  
”Харківський політехнічний інститут”

Захист відбудеться 18 травня 2006 р. о 14<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 55.051.03 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 “14” квітня 2006 р.

**Вчений секретар**  
спеціалізованої вченої ради

**Савченко Є.М.**

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### Актуальність теми

Розвиток багатьох галузей народного господарства супроводжується появою нових, часом більш складних технологічних процесів. Ефективна реалізація останніх потребує створення відповідних машин, агрегатів та технічно складних комплексів із сучасного інженерного обладнання.

До таких напрямків відносяться технологічні процеси, для яких характерними є хіміко-біологічні явища при певних температурних режимах середовища. Створення агрегатів для таких технологій є досить складною науковою та інженерною задачею, яка потребує поряд з глибоким знанням робочого процесу обґрунтування також економічної та екологічної доцільності їх застосування. За названих обставин зараз досить часто реалізуються рішення щодо створення машин вузького призначення для виконання лише однієї технологічної операції або її частини. Такі агрегати, як правило, відрізняються складністю конструкції, що негативно позначається на експлуатаційних характеристиках і вартості устаткування.

Більш виправданим є підхід, при якому з метою підвищення ефективності технологічних процесів одержання відповідних продуктів економічно доцільною виявляється реалізація декількох операцій у рамках однієї машини (комбінування процесів нагрівання рідини і подрібнення включень, що знаходяться у робочому середовищі, перемішування і перекачування продукту і т.п.).

Останнім часом з'являються нові технологічні рішення, для яких одним із обов'язкових процесів є розігрів рідкого робочого середовища. В цих умовах ефективність устаткування, що працює у системах, необхідно оцінювати не за загальноприйнятим механічним коефіцієнтом корисної дії (ККД), а з урахуванням ефективності перетворення в теплоту загальної кількості енергії, що споживається. За цих обставин втрати енергії, що обумовлені механічними тертями у вузлах машини та в'язкісними силами в рідкому робочому середовищі, використовуються корисно і спричиняють розігрів робочого середовища. Таким чином, у зазначених системах можна вважати виправданим зниження енергетичної досконалості проточної частини робочих машин (в механічному розумінні) і при цьому об'єднання декількох технологічних процесів в один. Наслідком такого підходу є спрощення конструкції і підвищення технологічності устаткування.

Об'єднання в одному агрегаті декількох технологічних процесів (фактор багатофункціональності) супроводжується ускладненням робочого процесу машини в цілому. Методики розрахунку багатофункціональних агрегатів, методи прогнозування їх робочих характеристик суттєво ускладнюються і з достатньою точністю можуть бути отримані лише на основі ґрунтовних досліджень і глибокого аналізу робочого процесу таких машин.

Дана дисертаційна робота присвячена дослідженню характеристик і створенню методик

розрахунку багатофункціональних теплогенеруючих агрегатів (ТГА). ТГА – машина гідродинамічного принципу дії, призначена для перетворення механічної енергії обертового руху ротора двигуна в теплову і механічну енергію робочого середовища. ТГА може бути використаний для одержання гарячої води з метою її безпосереднього використання в технологічних процесах або як теплоносія у системах для обігріву приміщень тощо. Крім цього, використання ТГА можливе для ряду інших технологічних операцій (одержання соєвої суспензії, рідких кормових сумішей, підготовка зернового замісу у спиртовій промисловості тощо). У межах базових варіантів ТГА може бути отримана комбінація реалізованих машиною процесів при внесенні в агрегат незначних конструктивних змін. Генерація тепла відбувається під час проходження декількох процесів (перемішування, здрібнювання, перекачування). Для таких специфічних технологічних процесів використання, наприклад, тенів як нагрівальних елементів виявляється або неможливим, або вимагає надто складних конструктивних рішень.

Таким чином, дослідження робочого процесу ТГА і створення методики розрахунку його характеристик є актуальним і практично значущим.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами**

Наукові розробки реалізовані при виконанні держбюджетної НДР за темою:

80.01.05.03-05 д/б “Наукові основи технічного забезпечення енергозберігаючих технологій у гідропневмосистемах” (замовник – Міністерство освіти і науки України, номер державної реєстрації 0103 U000769).

### **Мета і задачі дослідження**

Мета роботи - вивчення впливу геометричних параметрів проточної частини, частоти обертання і характеристик робочого середовища на енергетичні характеристики ТГА, створення методики розрахунку машини, а також визначення особливостей розрахунку і проектування ТГА під різні технологічні напрямки.

Для досягнення поставленої мети сформульовані такі задачі:

- визначити особливості руху однофазного робочого середовища в елементах проточної частини ТГА;
- дослідити вплив різних факторів (конструктивні параметри, частота обертання) на енергетичні характеристики машини;
- вивчити особливості застосування законів теорії подібності для перерахування робочих характеристик ТГА;
- дослідити вплив окремих процесів (подрібнення, перекачування) ТГА на енергетичну характеристику машини;
- розробити методику розрахунку параметрів ТГА на задані умови роботи.

*Об'єкт дослідження* – робочий процес теплогенеруючого агрегату.

*Предмет дослідження* – робота теплогенеруючого агрегату гідродинамічного принципу дії на однофазних та двофазних робочих середовищах.

*Методи дослідження.* Розв’язування поставлених задач проводилося з використанням розрахунково-аналітичного методу, із застосуванням математичного і фізичного (на експериментальному стенді) моделювання робочого процесу теплогенеруючого агрегату.

Розрахунково-аналітична частина роботи ґрунтувалася на фундаментальних законах механіки рідини і газу, базових положеннях теорії подібності і теорії турбомашин. Розрахунковий експеримент проводився за допомогою програмного комплексу FlowVision.

Фізичний експеримент як складова частина проведеного дослідження містив у собі моделювання процесу перетворення механічної енергії обертового руху ротора в теплову енергію робочого середовища. Визначалися енергетичні характеристики ТГА при різних частотах обертання ротора, геометричних параметрах і характеристиках робочого середовища.

Достовірність отриманих експериментальних результатів обґрунтована використанням загальноновизнаної методики проведення відповідних випробувань, а також задовільною похибкою вимірювання фізичних величин при виконанні експериментальної частини дослідження.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- встановлено взаємозв’язки між гідродинамічними та геометричними параметрами ТГА, що дає можливість прогнозувати енергетичну характеристику машини на етапі її проектування;
- визначено особливості застосування теорії подібності, що дозволяє виконувати модельний перерахунок характеристик ТГА з існуючої моделі;
- запропоновано узагальнену функціональну залежність балансу енергії в проточній частині ТГА, яка дозволяє визначати питомий внесок окремих процесів в енергетичну характеристику ТГА.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

- розроблено рекомендації щодо оптимального вибору конструктивних параметрів ТГА, сформульовані методичні рекомендації щодо прогнозування енергетичної характеристики агрегату;
- створений типорозмірний ряд багатофункціональних ТГА;
- створено експериментальний стенд, що дозволяє проводити випробування проточних частин ТГА (як в одно-, так і в багатоступеневому виконанні) на різних робочих рідинах і з можливістю регулювання частоти обертання ротора до 2000 об/хв;
- результати дисертаційної роботи впроваджені на промисловому підприємстві України ЗАТ “НВО“Гідромаш”, сільськогосподарському ЗАТ “Маяк”, ТОВ АФ “Родючість”, СП “Родючість”, ТОВ “Плодорозсадник” і в навчальний процес СумДУ, що підтверджується наведеними в дисертації актами впровадження.

#### **Особистий внесок здобувача**

У написаних в співавторстві наукових публікаціях, що розкривають результати, отримані у процесі виконання дисертаційної роботи, здобувачу належать:

[1] – розроблення і створення експериментального стенда для дослідження робочого процесу теплогенеруючих агрегатів, а також проведення експериментального дослідження енергетичних характеристик ТГА з різними робочими органами на частотах обертання до 200 об/хв; [2] – проведення розрахункового аналізу енергетичної характеристики ТГА при роботі на частотах обертання ротора до 1500 об/хв; [4] – розроблення промислового зразка багатофункціонального ТГА, проведення експериментального дослідження енергетичної і теплової характеристик машини, зіставлення результатів, отриманих теоретичним і експериментальним шляхом; [5] – проведення розрахункового експерименту, спрямованого на дослідження робочого процесу ТГА, одержання інтегральних залежностей моментних і витратних характеристик, і порівняння з раніше отриманими експериментальними даними; [6] – виконання огляду машин-аналогів і можливих сфер використання багатофункціонального ТГА.

Поставлення задач, вибір методів дослідження та аналіз отриманих результатів проводилися спільно з науковим керівником, д-ром техн. наук., проф. Волковим М.І.

#### **Апробація роботи**

Основні положення і результати дисертації доповідалися й обговорювалися на:

- 7-й, 8-й, 9-й та 10-й Міжнародних конференціях "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" (м. Київ, 2002, 2004; м. Черкаси, 2003; м.Краматорськ, 2005);
- Міжнародній науково-технічній конференції "Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання" (м. Харків, 2003);
- Міжнародній науково-технічній конференції, присвяченій 100-річчю Т.М. Башти (м. Київ, 2004);
- науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів і студентів СумДУ (щорічно з 2001 по 2005 роки включно).

#### **Публікації**

За матеріалами дисертації опубліковано 7 наукових праць, з них 5 у виданнях, затверджених переліком ВАКу України. Матеріали дисертаційного дослідження використовувалися також у звітах по НДР. За результатами дослідження багатофункціонального ТГА отриманий деклараційний патент України на корисну модель.

#### **Структура й обсяг дисертаційної роботи**

Робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації – 142 сторінки, у тому числі 74 рисунки, з яких 2 на окремих аркушах, 17 таблиць, бібліографія з 87 джерел на 8 сторінках, 3 додатки на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність проведення дослідження робочого процесу теплогенеруючих агрегатів та розроблення методики розрахунку енергетичних характеристик агрегатів, що призначені для різноманітних сфер використання та працюють на однофазному чи двофазному робочих середовищах. Сформульовані мета та задачі дослідження, дається загальна характеристика роботи.

У **першому розділі** викладені результати інформаційно-аналітичного огляду сучасного стану проблеми, пов'язаної з роботою теплогенеруючих агрегатів.

З огляду на відносну новизну створення і дослідження робочого процесу ТГА, машини-аналоги класифіковані в такий спосіб:

- конструктивні аналоги;
- функціональні аналоги.

Здебільшого машини, функціонально подібні до ТГА, мають істотно різні конструкції, що призводить до відмінностей в їх робочих процесах. Тому як базові машини, конструктивно подібні до ТГА, можна розглядати:

- гідравлічні гальма;
- мішалки різного технологічного призначення.

Як базова машина-аналог для теплогенеруючого агрегату з усіх видів гідрогальм обране лопатеве гідравлічне гальмо.

Гідрогальмо є специфічною машиною, у якій споживану потужність свідомо перетворюють у втрати, внаслідок чого тепла енергія робочої рідини, у яку перетворилася механічна енергія гальмування, через стінки розсіюється в повітрі, корисно не використовуючись. Тому, на відміну від більшості машин, при оцінюванні якості гідрогальм такий показник, як коефіцієнт корисної дії, не використовується.

З усіх видів механічних мішалок найбільш близькою за конструкцією до ТГА є лопатева.

Лопатеві мішалки – це пристрої, що складаються з двох чи більшої кількості лопатей прямокутного перетину, закріплених на обертовому вертикальному чи похилому валі.

*Сфери застосування, конструктивні різновиди й особливості ТГА*

На цей час можна назвати ряд можливих сфер застосування теплогенеруючих агрегатів:

*розігрів води (чи іншої рідини):*

- а) з метою опалення житлово-комунальних об'єктів чи приміщень іншого призначення;
- б) підігрів води з метою забезпечення гарячого водопостачання;

Виконаний огляд машин, призначених для реалізації даного напрямку, дозволив умовно

поділити теплогенератори на два типи:

1) теплогенератори, які передбачають наявність циркуляційного насоса та з'єднувальних трубопроводів. У таких системах відбувається наступне перетворення енергії: механічна енергія привідного двигуна циркуляційним насосом перетворюється в гідравлічну енергію робочого середовища, яка в теплогенераторі перетворюється в тепло. Таким чином, теплогенератори являють собою місцеві опори з досить великим коефіцієнтом опору.

У дисертаційній роботі розглянуті конструкції теплогенераторів, запропоновані Г.Г. Іваненком, І.П. Суловим, Г.С. Столяренком, В.О. Костигінім, В.Я. Собашко, А.Д. Тараном, С.Б. Осипенком, В.І. Сухоносим, Г.А. Чесноковим, Г.Г. Грабовським та ін.

До переваг теплогенераторів таких конструкцій можна віднести те, що для систем, в яких насос та нагрівач знаходяться на значній відстані, генерація тепла відбувається безпосередньо в теплогенераторі, що дещо знижує втрати теплової енергії на відрізьку насос – теплогенератор.

До недоліків наведених схем можна віднести те, що в більшості з них одним із головних елементів є насос. Здебільшого насосне обладнання проектується на принципах енергоефективності, що призводить до технологічного та конструктивного ускладнення. Це у кінцевому підсумку негативно позначається на вартості всієї системи.

Інший тип розглянутих теплогенераторів передбачає перетворення механічної енергії обертового вала в теплову енергію робочого середовища безпосередньо в апараті.

Розігрів рідини в теплогенераторах Р.А. Болотова, В.А. Попова, О.І. Грабовенка, І.В. Ніколенка, С.Б. Осипенка, А.Ф. Кладова, А.Д. Петракова, Ю.С. Потапова та ін. відбувається за рахунок створення кавітаційного режиму або сил гідродинамічного тертя.

Більшість наведених теплогенераторів не мають недоліків агрегатів, що працюють за схемою насос – теплогенератор – система, але вони здебільшого використовуються для перетворення механічної енергії в теплову в системах опалення. Це не дає можливості повного використання всіх процесів, які відбуваються в наведених гідродинамічних машинах.

*Виконання технологічних операцій:*

а) реалізація технологічних процесів сільського господарства (одержання соєвої суспензії, одержання рідких кормових сумішей і т.п.);

Останнім часом у сільському господарстві з'являються і все більше використовуються нові технології кормоприготування для тварин. До таких технологій можна віднести одержання соєвої суспензії. Особливістю цієї технології є необхідність здрібнення бобів сої у водному середовищі з одночасним підігрівом (до температури більше 100°C) і перемішуванням робочого середовища. Як устаткування для реалізації даної технології можна вказати агрегат виробництва НПП "Інститут ТЕКМАШ", що працює за схемою насос – теплогенератор - ємність.

Крім технології одержання соєвої суспензії, на сільськогосподарських підприємствах активно



впроваджується технологія одержання рідких кормових сумішей. Суть даної технології полягає в подрібненні зерноsumіші (пшениця, горох, ячмінь, кукурудза) у водному середовищі з одночасним підігрівом до 30-40°C і перемішуванням суміші. Як обладнання для цієї технології можна навести агрегат “Мрія”, що випускається Науково-виробничим впроваджувальним центром Академії інженерних наук України.

б) Реалізація технологічних операцій в інших сферах.

Крім вищенаведених напрямків, існує цілий ряд технологій, для яких необхідно робити подрібнення твердих включень з одночасним перемішуванням і підігрівом суміші (технологія одержання спирту, кетчупів, паст). Для багатьох напрямків існують машини, що забезпечують поетапну реалізацію процесу (сухе здрібнювання продукту, процес розчинення у водному середовищі, підігрів суміші).

У першому розділі також виконаний аналіз розрахункових моделей для таких аналогів, як гідравлічні гальма (Б.А. Гавриленко, В.А. Мінін, Л.С. Оловников), мішалки (Ф. Стренк, Л.Н. Брагинский, З. Штербачек) та роторні апарати (В.М. Черв'яков, О.А. Кокушкин, А.А. Барам), а також обґрунтовано неадекватність розглянутих моделей при розрахунку ТГА.

У першому розділі формулюються мета проведення дослідження та задачі, які вирішувались для її досягнення. Описані методи та засоби проведення дослідження. Під час вибору технічного

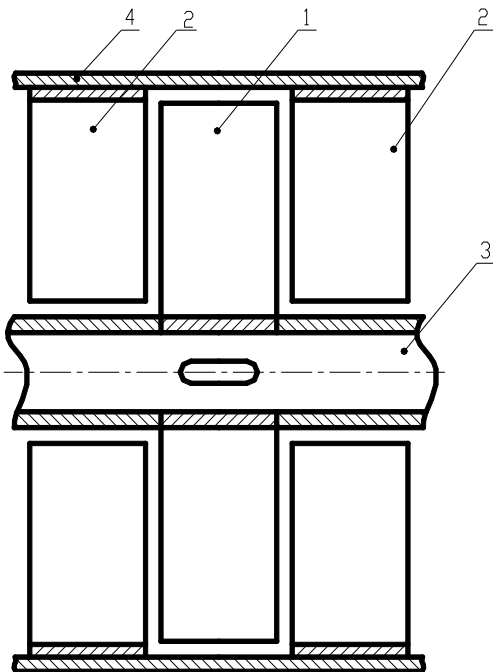


Рис.1. Технічний об'єкт дослідження

об'єкта дослідження перевага віддана найбільш простій та технологічній схемі. Технічний об'єкт дослідження (рис. 1) є системою, яка складається з робочого колеса 1, розміщеного між двома статорними колесами 2. Робоче колесо встановлено на роторі 3 за допомогою шпонкового з'єднання і являє собою (рис. 2) втулку з плоскими радіальними лопатями. Статорні колеса являють собою бандаж з плоскими радіальними лопатками. Статорні колеса нерухомо закріплені в корпусі 4.

Основною особливістю ТГА є наявність роторного колеса, встановленого між статорними колесами, що створюють додатковий опір переміщенню робочого середовища.

У другому розділі розглянута розрахункова схема, яка при первісному аналізі дозволила визначити параметри, що найбільше впливають на енергетичну

характеристику ТГА.

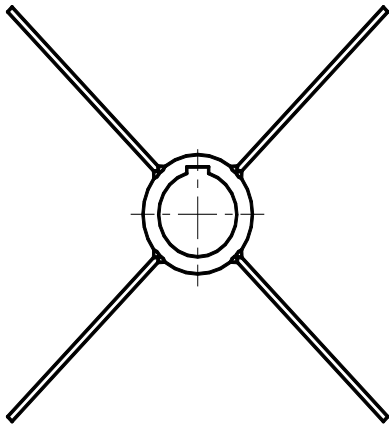


Рис. 2. Робоче колесо

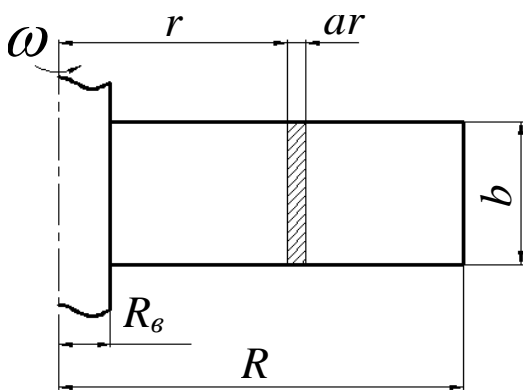


Рис. 3. Розрахункова схема

Розрахункова схема базується на обертанні з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  плоскої радіальної пластини радіусом  $R$ , що кріпиться до вала радіусом  $R_B$  в нерухомому рідкому середовищі (рис. 3).

Гідродинамічна сила, яка діє на елементарну площадку  $dS = bdr$ , визначалася як

$$dF = 0.5\rho\omega^2 r^2 bdr, \quad (1)$$

де  $\rho$  - густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ .

Момент, який створюють гідродинамічні сили при обертанні плоскої пластини:

$$M = 0.5\rho\omega^2 b \int_{R_B}^R r^3 dr, \quad (2)$$

тоді потужність, яка необхідна для обертання плоскої пластини в рідині з кутовою швидкістю  $\omega$ :

$$N = M\omega, \quad (3)$$

або

$$N = 0.5\rho\omega^3 b \int_{R_B}^R r^3 dr. \quad (4)$$

Враховуючи залежність кутової швидкості  $\omega$  від частоти обертання  $n$ , об/хв, (4) записано у вигляді

$$N = \frac{\rho\pi^3 n^3 b}{216000} (R^4 - R_B^4). \quad (5)$$

Отримана залежність дозволяє визначити величину потужності для однієї лопаті на робочому колесі. У разі розміщення на робочому колесі  $i$  лопатей та при багатоступеневому виконанні агрегату із загальною кількістю робочих коліс  $k$  залежність (5) записано у такому вигляді:

$$N = \frac{\rho\pi^3 n^3 b}{216000} (R^4 - R_B^4) ik,$$

або

$$N \approx \frac{\rho n^3 b}{111461.3} (D^4 - D_B^4) ik. \quad (6)$$

Наявність у формулі (6) множника  $ik$  фактично є збільшенням лише сумарної площі лопатей без урахування їх дискретного розміщення і особливостей взаємодії з рідиною.

Слід зазначити, що наведена розрахункова схема не відображає впливу всіх параметрів на енергетичну характеристику агрегату і додатково потребує уточнення впливу:

- 1) кількості дискретно розміщених лопатей на робочому колесі ТГА;
- 2) кількості та ширини лопаток на статорних колесах;
- 3) твердих включень, що подрібнюються, у робочому середовищі;
- 4) витрати рідини через проточну частину агрегату.

Складна нестационарна та просторова течія рідини в проточній частині ТГА, одночасність проходження декількох різних процесів потребують складної математичної моделі робочого процесу. В такому поставленні задачі розв'язання фундаментальних рівнянь гідродинаміки (рівнянь Нав'є-Стокса, Рейнольдса) без певних припущень неможливе. Тому з метою найбільш повного врахування особливостей робочого процесу ТГА моделювання проводилося шляхом чисельного розв'язання вищезазначених рівнянь за допомогою програмного комплексу FlowVision.

Процес розрахунку течії рідини в проточній частині ТГА складався з декількох етапів: побудова області розрахунку в САПР та її імпортування в FlowVision; вибір математичної моделі; задання граничних умов; задання початкової розрахункової сітки та критеріїв її адаптації; проведення розрахунку; перегляд результатів розрахунку в графічній формі та збереження даних у файлі.

Попередня перевірка розрахунковим методом підтвердила структурні залежності (6) між потужністю ТГА та конструктивними і режимними параметрами, крім лінійної залежності потужності від кількості лопатей робочого колеса (рис. 4, 5 і 6).

Визначено, що аналітична модель не враховує впливу на енергетичну характеристику агрегату таких параметрів, як кількість лопатей РК, кількість та ширина лопаток статорних коліс, які суттєво впливають на робочий процес ТГА.

Було запропоновано наступний підхід щодо уточнення аналітичної моделі – вплив кількості лопатей РК  $i$ , кількості  $i_c$  та відносної ширини  $\bar{b}$  (відношення ширини лопатей статорного колеса до ширини РК) лопаток статорних коліс врахувати за допомогою коефіцієнта потужності  $K_N$ .

Аналітичну модель (6) записано у такому вигляді:

$$N \approx K_N \frac{\rho n^3 b}{111461.3} (D^4 - D_B^4) k. \quad (7)$$

При цьому коефіцієнт потужності є функцією трьох аргументів:

$$K_N = f(i, i_c, \bar{b}) \quad (8)$$

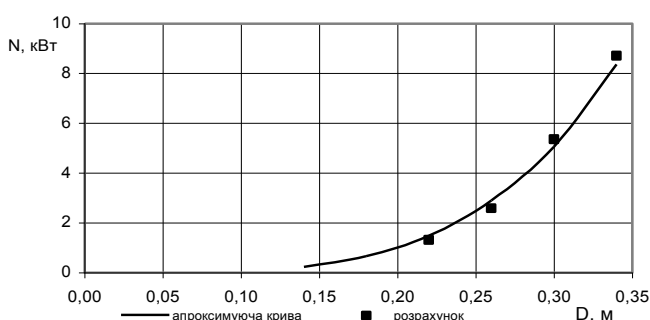


Рис. 6. Залежність потужності ТГА від діаметра РК

Знаходження залежності (8) виконувалося методами рототабельного планування другого порядку. При цьому фактором оптимізації був обраний  $K_N$ , а математична модель визначалася у вигляді полінома другого степеня:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (9)$$

Рівні та інтервали варіювання факторів наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Фактор	Кодове позна-че ння	Інтервал варі-юва ння	Рівні факторів				
			зіркова точка +1.682	верхній +1	основ-ни й 0	нижній -1	зіркова точка -1.682
			$i$ - кількість лопатей РК	$x_1$	3	13	11
$i_c$ - кількість лопаток статорного колеса	$x_2$	3	12	10	7	4	2
$\bar{b}$ - відносна ширина стат. колеса	$x_3$	0,3	1,2	1	0,7	0,4	0,2

Для визначення коефіцієнтів регресії моделі (9) були виконані три серії розрахункового дослідження: у ядрі та центрі плану, а також у зіркових точках.

Після обробки результатів розрахункового дослідження та переходу від кодованих значень факторів рівняння регресії (9) було записане у вигляді:

$$K_N = -24.879 + 2.44i + 2.72i_c + 43.26\bar{b} - 0.034i\bar{b} - 0.37i_c\bar{b} - 1.31i_c\bar{b} + 0.074i_c\bar{b} -$$

$$-0.123i^2 - 0.134i_c^2 - 21.28\bar{b}^2. \quad (10)$$

Порівняння результатів, отриманих за допомогою моделі (10), з результатами, отриманими при однофакторному варіюванні параметрів, дозволило зробити висновки щодо задовільного узгодження розрахункових однофакторних залежностей та залежностей, отриманих за допомогою розрахункової моделі коефіцієнта потужності. Величина максимальної неузгодженості не перевищує 8%.

**У третьому розділі** наведені результати експериментальної перевірки розробленої методики, а також виконана оцінка похибок проведення експериментів. Результати розрахунку та експерименту при дослідженні впливу діаметра робочого колеса на енергетичну характеристику ТГА задовільно узгоджуються між собою (рис. 7), максимальна величина неузгодженості не перевищує 7.5%, що дає можливість зробити висновок щодо відповідності залежності  $N \sim D^4$ .

При дослідженні впливу ширини лопатей робочого колеса (рис. 8) максимальна величина неузгодженості 12% має місце для РК з шириною 15 мм, що є наслідком майже однакового рівня ширини РК та зазора між РК і статорними колесами. Це ускладнює формування стабільних великомасштабних вихрових структур, внаслідок чого спостерігається зниження рівня потужності відносно прогнозованого (розрахункового). Для інших рівнів ширини РК величина неузгодженості не перевищує 5%.

Експериментальна перевірка залежності потужності від частоти обертання (рис.9) також підтвердила відповідність аналітичної залежності (6).

Наступним етапом експериментального дослідження була перевірка залежності, отриманої шляхом розрахункового рототабельного планування. На рис. 10 та 11 наведено порівняння результатів залежності (10) з результатами, отриманими експериментальним шляхом. При цьому й експериментальні, й розрахункові характеристики мають якісно однакову форму й збіг оптимальних діапазонів параметрів. Спостерігається незначна розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними, яка в межах використання залежності (10) не перевищує 7%.

Ряд технологічних напрямків вимагає комбінування декількох процесів в одному агрегаті. Залежно від особливостей технологій відповідно змінюються вимоги до багатофункціонального обладнання. Для ряду технологічних напрямків обґрунтована доцільність використання ТГА як багатофункціонального обладнання.

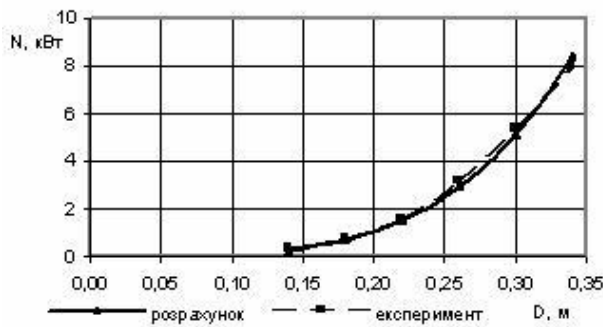


Рис. 7. Розрахункові та експериментальні характеристики ТГА залежно від діаметру РК

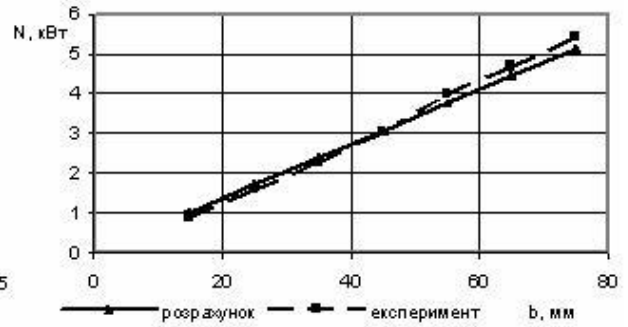


Рис. 8. Розрахункові та експериментальні характеристики ТГА залежно від ширини РК

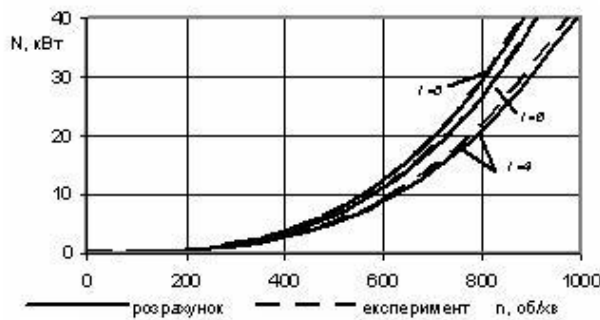


Рис. 9. Розрахункові та експериментальні характеристики ТГА при роботі на різних частотах обертання

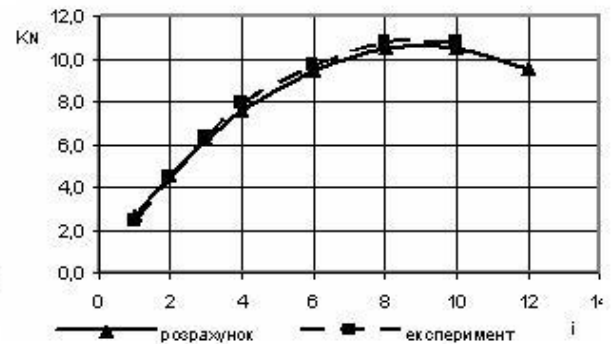
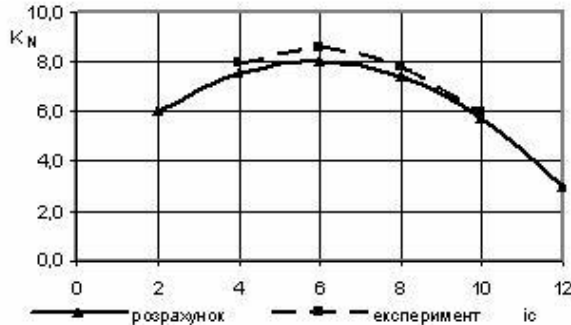
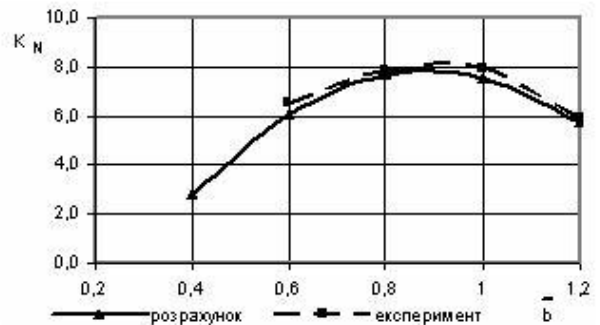


Рис. 10. Розрахункові та експериментальні залежності коефіцієнта потужності від кількості полюсів РК



а)



б)

Рис. 1.1 Розрахункові та експериментальні залежності коефіцієнта потужності від: а) кількості полюсів статорних котіс; б) відносної ширини статор-них котіс

Відповідь на питання щодо насосного ефекту ТГА, а також впливу величини витрати через проточну частину на енергетичну характеристику агрегату є досить актуальною.

Вивчення насосного ефекту агрегатів, що досліджуються, є досить широким багатofакторним питанням, тому в рамках даної роботи були зроблені спроби початкового прогнозу та отримання рекомендацій щодо коригування енергетичної характеристики ТГА з урахуванням процесу перекачування.

Експериментальні дослідження проводилися на виймальній частині промислового зразка багатофункціонального теплогенеруючого агрегату, яка конструктивно передбачала прокачування

робочого середовища.

На рис. 12 наведена залежність величини напору та потужності агрегату від витрати рідини. Напірна та енергетична характеристики є характерними для вихрових насосів, мають майже лінійний характер, при цьому напірна характеристика має спадний характер, у той час як спостерігається зростання потужності, що споживається, зі збільшенням витрати через проточну частину агрегату. Потужність ТГА при максимальній витраті збільшується на 25% від базової величини (потужність при нульовій витраті за умов роботи на чистій воді). На рис. 13 наведена залежність гідравлічної енергії (обчисленої класичним методом для динамічних насосів) на виході з ТГА залежно від витрати.

Аналіз рис. 12 та 13 дав можливість зробити висновок, що підвищення потужності ТГА при прокачуванні робочого середовища через проточну частину частково зумовлено тим, що частина механічної енергії перетворюється в гідравлічну енергію потоку рідини, а частково – тим, що відбувається інтенсифікація вихрового процесу та зміна структури течії.

Слід відзначити, що тенденції підвищення потужності ТГА при збільшенні витрати рідини спостерігаються не тільки при проведенні фізичного експерименту, але й при розрахунковому дослідженні в програмному комплексі FlowVision.

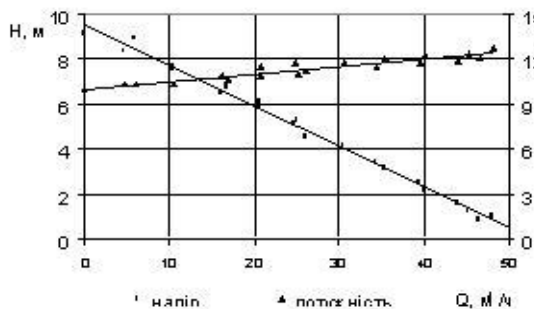


Рис. 12. Залежність напору та потужності ТГА від величини витрати

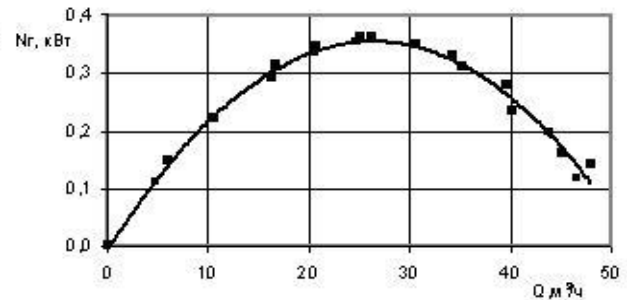


Рис. 13. Залежність гідравлічної енергії потоку від величини витрати

Виконаний аналіз можливих сфер застосування дозволив зробити висновок щодо необхідності дослідження впливу твердих включень в робочому середовищі на енергетичну характеристику агрегату.

За таких умов була проведена серія експериментів щодо визначення частки енергії, що витрачається на подрібнення сільськогосподарських культур. Слід зазначити, що наведені технології передбачають масову частку сільськогосподарських культур, яка не перевищує 30% від маси готової суміші. Для технології приготування соєвої суспензії масова частка сухої сої становить 22%.

Залежності потужності, що споживалася агрегатом, та температури розігріву робочого середовища від часу роботи ТГА на сільськогосподарських культурах (рис.14) дають можливість зрозуміти тенденції, які відбуваються при роботі на двофазних робочих середовищах.

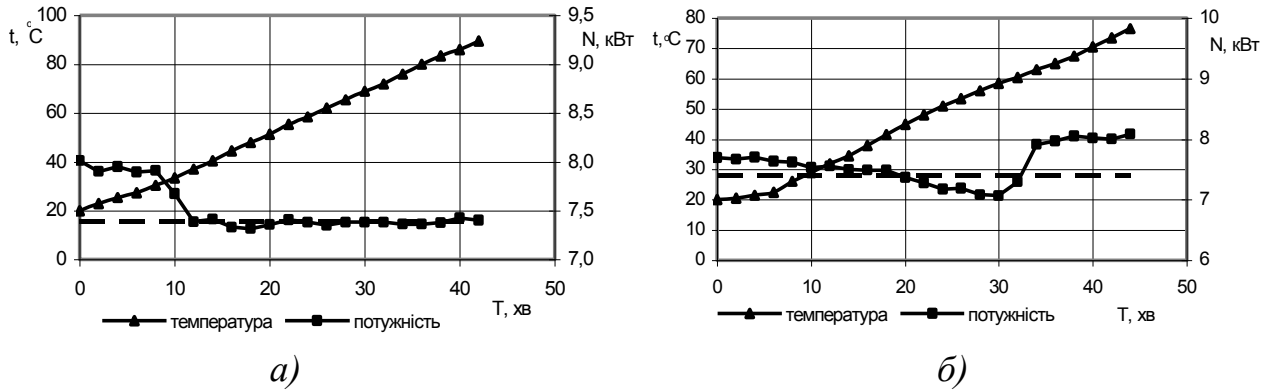


Рис. 14. Залежність величини розігріву робочого середовища та величини потужності ТГА від часу роботи агрегату при подрібненні різних культур: а) соя; б) зернова суміш

Проведені експериментальні дослідження ТГА при його роботі на двофазних середовищах свідчать про те, що подрібнення твердих включень в проточній частині агрегату супроводжується підвищенням потужності відносно базового рівня, що вимагає врахування при розробленні та конструюванні агрегатів.

Тенденції, які спостерігаються при подрібненні та розігріванні певного робочого середовища, залежать від його характеристик.

При роботі ТГА на сумішах, що містять зернові культури з масовою часткою до 30%, можна рекомендувати 10% запас потужності відносно розрахункового (робота на чистій рідині).

Використання ТГА для подрібнення речовин іншого походження вимагає додаткового дослідження.

Дослідження робочого процесу проводилося без прив'язки до конкретного напрямку, за таких умов в дисертаційній роботі наведений діапазон використання запропонованої методики та рекомендацій табл.2.

Таблиця 2

#### Рекомендований діапазон використання методики

№ п/п	Найменування параметра	Мін. знач.	Макс. знач.
1.	Діаметр РК, мм	100	350
2.	Ширина РК, мм	15	90
3.	Кількість лопатей РК	3	13
4.	Відносна ширина лопаток статорних коліс	0.2	1.2
5.	Кількість лопаток статорних коліс	2	12
6.	Частота обертання ротора ТГА, об/хв	0	1500
7.	Масова кількість твердих включень в робочому середовищі	0	30%

У четвертому розділі виконаний аналіз розрахункової залежності (10), який свідчить про наявність оптимального діапазону наведених параметрів.

Шляхом моделювання параметрів у таких діапазонах: кількість лопатей РК від 3 до 13,



кількість лопаток статорних коліс від 2 до 12, відносна ширина лопаток статорних коліс від 0.2 до 1.2 – було знайдено такі оптимальні параметри: кількість лопатей РК – 9, кількість лопаток статорних коліс – 7, відносна ширина статорних коліс – 0.83. Максимальне значення коефіцієнта потужності при цьому становить 12.2.

Крім цього, запропоновано залежність щодо модельного перерахунку параметрів:

$$\frac{N_H}{N_M} = \left( \frac{n_H}{n_M} \right)^3 \lambda^5 \frac{K_{NH}}{K_{NM}} \quad (11)$$

Також подано інформацію щодо створених теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення, зокрема:

- для технологій кормоприготування у тваринництві;
- для технології підготовки зернового замісу в спиртовому виробництві.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача створення методики розрахунку теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення при роботі на одно- або двофазних робочих середовищах.

За результатами виконаної роботи можна зробити такі висновки:

- визначено, що використання методик розрахунку аналогів ТГА не дозволяє з необхідною точністю прогнозувати енергетичну характеристику агрегату внаслідок значної розбіжності робочих процесів;
- розглянута аналітична розрахункова схема, яка базується на обертанні плоскої радіальної пластини в рідкому середовищі. За допомогою такого підходу отримано аналітичну залежність потужності ТГА від конструктивних та режимних параметрів агрегату. Визначені неточності отриманої моделі;
- запропоновано підхід щодо дослідження робочого процесу ТГА шляхом чисельного моделювання в програмному комплексі FlowVision. Виконана перевірка структурних залежностей аналітичної моделі, що дозволило ввести поняття коефіцієнта потужності та подальші результати аналізувати в безрозмірному вигляді;
- визначено, що найбільший вплив на коефіцієнт потужності мають такі параметри проточної частини ТГА: кількість лопатей РК, кількість та відносна ширина лопаток статорних коліс. Розрахункові характеристики підтвердили нелінійну залежність потужності агрегату (з наявністю оптимальної зони) від вищезазначених параметрів;

- запропоновано підхід щодо визначення залежності коефіцієнта потужності від ряду конструктивних параметрів проточної частини шляхом рототабельного планування другого порядку, а також виконано зіставлення з розрахунковими характеристиками. Підтверджено, що модель, отримана шляхом рототабельного планування у визначеному діапазоні, дозволяє отримувати адекватні результати, які відрізняються від розрахункових не більше ніж на 8%;

- отримані розрахункові поля швидкостей та тисків у проточній частині агрегату, а також виконаний аналіз змін картин течії при зміні деяких параметрів ТГА. Це дозволило зрозуміти особливості робочого процесу теплогенеруючих агрегатів. Визначено, що особливістю робочого процесу ТГА є формування двох торообразних вихрів, розміри та положення яких в проточній частині агрегату значною мірою визначають енергетичну характеристику ТГА. Визначено, що найбільша потужність споживається при формуванні великомасштабних вихрових структур, центри яких знаходяться на рівні зазора між РК та статорним колесом;

- виконана експериментальна перевірка як аналітичної моделі, так і залежності коефіцієнта потужності, яка підтвердила відповідність результатів;

- запропоновано підхід щодо балансу енергій ТГА багатофункціонального призначення. Визначено, що більшу частку потужності агрегату складає в'язкісне тертя робочого середовища, але також впливають наявність твердих включень, які подрібнюються, та величина витрати рідини через проточну частину агрегату. Визначені рекомендації щодо величини потужності, яка витрачається на подрібнення деяких сільськогосподарських культур. Визначено, що прокачування робочого середовища через проточну частину призводить до підвищення потужності агрегату. При цьому підвищення потужності частково зумовлено перетворюванням в гідравлічну енергію робочого середовища, а частково – інтенсифікацією в'язкісного перемішування;

- визначено оптимальні геометричні параметри проточної частини ТГА, зокрема: кількість лопатей РК - 9, кількість лопаток статорних коліс - 7, відносна ширина статорних коліс – 0.83;

- створено дослідно-промислові зразки ТГА багатофункціонального призначення для кормоприготування у тваринництві та для потреб спиртової промисловості.

Результати виконаного дослідження впровадженні на промисловому підприємстві ЗАТ “НВО “Гідромаш”, сільськогосподарських підприємствах: СЗАТ “Маяк”, АФ “Родючість”, СП “Родючість”, ТОВ “Плодородсадник” та у навчальному процесі СумДУ.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА**

1. Волков Н.И., Каплун И.П., Папченко А.А. Теплогенерирующий агрегат для ветроэнергетической установки малой мощности// Вестник НТУУ “КПИ”. Машиностроение. - 2002. – Вып. 42, Т.2. – С. 75-78.
2. Волков Н.И., Папченко А.А. Разработка быстроходного теплогенерирующего агрегата для ветроэнергетических установок малой мощности// Вісник СумДУ. Серія Технічні науки (Машинобудування). - 2003. - №13(59) - С. 164-169.
3. Папченко А.А. Использование теплогенерирующего агрегата в технологических процессах животноводства// Збірник наукових праць (Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання). – Харків: ІПМаш ім. А.М. Підгорного НАН України, 2003. – С.611-613.
4. Волков Н.И., Папченко А.А. Многофункциональный теплогенерирующий агрегат и его использование для приготовления кормовых смесей в сельскохозяйственных предприятиях// Всеукраїнський науково-технічний журнал “Промислова гідравліка і пневматика”. – 2004. – №1(3). – С. 99-102.
5. Волков Н.И., Кочевский А.Н., Папченко А.А. Исследование гидродинамики рабочего процесса многофункционального теплогенерирующего агрегата ТГА-2 расчетным способом с применением пакета FlowVision// Всеукраїнський науково-технічний журнал “Промислова гідравліка і пневматика”. – 2005. – №1(7). – С. 35-40.
6. Волков Н.И., Каплун И.П., Папченко А.А., Руденко А.А. Новая техника для перспективных технологий// Насосы & оборудование. – 2004. – № 3-4. – С. 34-36.
7. Деклараційний патент на корисну модель №3230 України, МПК F15D1/00/Гідродинамічний теплогенеруючий агрегат/ М.І. Волков, А.О. Євтушенко, І.П. Каплун, А.А. Папченко. – Опубл. 15.10.2004р., Бюл. №10.

## АНОТАЦІЯ

Папченко А.А. Гідродинаміка робочого процесу теплогенеруючого агрегату багатofункціонального призначення. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.17 - гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. - Сумський державний університет, Суми, 2006 р.

У дисертаційній роботі наведені результати дослідження робочого процесу теплогенеруючого агрегату, а також визначено вплив параметрів проточної частини (діаметр, ширина, кількість лопатей робочого колеса, кількість та ширина лопаток статорних коліс), частоти обертання та

характеристик робочого середовища на енергетичну характеристику агрегату. Запропоновано підхід щодо балансу енергії теплогенеруючого агрегату при його використанні як багатофункціонального обладнання.

Основним змістом роботи є отримання аналітичної залежності потужності агрегату від ряду параметрів, її уточнення шляхом використання коефіцієнта потужності, який отриманий розрахунковим методом у програмному комплексі FlowVision та подальша перевірка отриманих результатів шляхом проведення експериментальної частини дослідження.

**Ключові слова:** теплогенеруючий агрегат, багатофункціональне призначення, робоче колесо, рототабельне планування, коефіцієнт потужності.

## АННОТАЦІЯ

Папченко А.А. Гидродинамика рабочего процесса теплогенерирующего агрегата многофункционального назначения. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 - гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Сумский государственный университет, Сумы, 2006 г.

Проведение исследования, направленного на изучение рабочего процесса теплогенерирующего агрегата (ТГА) многофункционального назначения, обусловлено, во-первых, появлением ряда технологических процессов, которые совместно с нагревом рабочей среды требуют перемешивания, перекачивания рабочей среды, а также измельчения твердых включений, которые в ней содержатся, во-вторых, пересмотром существующих технологий, для которых имеется экономическая целесообразность замены узкофункционального оборудования на машины многофункционального назначения.

Анализ методик расчета конструктивных аналогов (гидравлические тормоза, лопастные мешалки, роторные аппараты) свидетельствует о неадекватности результатов при их использовании для расчета ТГА, что обусловило проведение исследования рабочего процесса.

Вопрос исследования рабочего процесса решался расчетно-аналитическим путем. Расчетная часть выполнялась посредством программного комплекса FlowVision и была направлена, во-первых, на изучение структуры течения жидкости в проточной части агрегата в зависимости от конструктивных и режимных параметров агрегата; во-вторых, проверку функциональных зависимостей аналитической модели, в-третьих, на уточнение аналитической модели посредством коэффициента мощности, который дополнительно учитывает влияние ряда параметров на энергетическую характеристику ТГА. Структура коэффициента мощности была определена путем

рототабельного планирования второго порядка и учитывала влияние таких параметров проточной части, как число лопастей рабочего колеса, число и относительную ширину лопаток статорных колес.

Экспериментальной частью исследования являлось получение энергетических и тепловых характеристик при различных конструктивных и режимных параметрах агрегата. Результатами экспериментальной части стали: проверка модели, полученной аналитическим путем; проверка структуры уточняющего коэффициента мощности при различных конструктивных параметрах, оценка удельного вклада процессов, которые реализуются в ТГА (измельчение, перекачивание, перемешивание) в общую структуру энергетической характеристики.

Определены приемлемые по точности результатов расчетов диапазоны применения разработанной методики в зависимости от конструктивного исполнения агрегатов и частот вращения их ротора.

Определены оптимальные параметры проточной части ТГА, а также получены зависимости, позволяющие выполнять расчет параметров агрегата с существующей модели.

Осуществлена экспериментальная проверка приводимых в работе рекомендаций по практическому использованию разработанной методики. Результаты работы внедрены на предприятиях Украины и в учебном процессе при подготовке специалистов в области гидромашиностроения.

**Ключевые слова:** теплогенерирующий агрегат, многофункциональное назначение, рабочее колесо, рототабельное планирование, коэффициент мощности.

## ABSTRACT

Papchenko A.A. Hydrodynamics of the working process of a heat generating unit of multi-functional application. – 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, 2006.

The thesis presents the results of investigation of the working process of a heat generating unit. The influence of parameters of flow passages (diameter, width, number of blades of the impeller, number and width of vanes of stator wheels), rotational speed and properties of the working medium on the performance curves of the unit was determined. An approach for composing the energy balance of the heat generating unit was suggested, when using it as a multi-functional equipment.

The essence of the thesis is determination of an analytical dependence of the power of the unit on a

number of parameters, and its correction by using a power coefficient obtained by computation using the software package FlowVision. Then the obtained results were checked by comparison with the results obtained in the experimental part of this research.

**Keywords:** heat generating unit, multi-functional application, impeller, rotatable planning, power coefficient.

Підп. до друку 10.04.2006 р.

Папір офс.

Формат 60×84/16.

Замовлення № 235

Друк офс.

Обл.-вид. арк. 0,9.

Наклад 100 прим.

Ум.друк.арк.1,1.

---

Видавництво СумДУ. Свідоцтво ДК№2365 від 08.12.2005р.

40007. м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2

Друкарня СумДУ. 40007. м.Суми, вул.Римського-Корсакова, 2