

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**Хованський Сергій Олександрович**

УДК 621.65

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ У СИСТЕМІ ВОДОПОСТАЧАННЯ  
ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА**

05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

Суми – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі прикладної гідроаеромеханіки Сумського державного університету Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
**Неня Віктор Григорович,**  
Сумський державний університет,  
доцент кафедри комп'ютерних наук.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ніколенко Ілля Вікторович,**  
Національна академія природоохоронного  
та курортного будівництва, м. Сімферополь,  
завідувач кафедри «Водопостачання, водовідведення  
та санітарна техніка»;


кандидат технічних наук  
**Руденко Андрій Анатолійович,**  
ВАТ «Науково-дослідний і проектно-  
конструкторський інститут атомного і  
енергетичного насособудування», м. Суми,  
перший заступник голови правління – директора,  
технічний директор.

Захист відбудеться “25” березня 2011 р. о 15<sup>00</sup> 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 ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2.

Автореферат розісланий “24” лютого 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

 – Є.М. Савченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Відцентрові насоси належать до найбільш поширеного класу лопатевих гідравлічних машин і використовуються у всіх галузях господарства України, зокрема на насосних станціях систем подачі та розподілу води житлово-комунального господарства. Частка енергії, що споживається приводом насоса, за різними джерелами оцінюється від 18 до 22 % усієї електроенергії, що використовується в господарстві країни.

При експлуатації відцентрових насосів необхідно брати до уваги, що вони відстежують опір гідравлічної мережі, який і визначає їх робочі режими. При відхиленні від робочого діапазону, на який спроектований насос, виникають додаткові втрати енергії, зумовлені появою зон зворотних течій, відривом вихорів тощо. Існує ряд технологічних систем, у яких гідравлічний опір змінюється в часі, і, як наслідок, насоси в них працюють у всьому можливому діапазоні подач. Наприклад, дослідженнями вітчизняних і зарубіжних авторів показано, що в системах подачі та розподілу води житлово-комунального господарства, насоси експлуатуються лише 9 – 25 % часу своєї роботи на режимах оптимального ККД. Таким чином, високий показник економічності насосів (паспортний ККД 75 – 85%) практично нівелюється низькою ефективністю їх роботи на гідравлічну мережу зі змінним опором.

Зменшення енергоспоживання окремого насоса при забезпеченні ним певних значень напору і витрати досягається за рахунок підвищення ККД. Багаторічний досвід досліджень, проектування та виробництва насосів провідними компаніями світу забезпечує сьогодні високе значення ККД в оптимальному режимі роботи насоса. Орієнтовно резерв підвищення ККД оцінюється в 2 – 6 % для насосів залежно від швидкохідності. Тому очікувати суттєвого підвищення ККД, а отже і зниження енергоспоживання за рахунок підвищення ККД окремого насоса, не варто.

Удосконалення експлуатаційних техніко-економічних показників насосного обладнання вимагає переходу до аналізу роботи не лише насосного агрегату, але і його взаємозв'язку з гідравлічною мережею. Однак на сьогодні такий підхід не характерний для вітчизняної практики насособудування.

Викладене вище обумовлює актуальність обраної теми дисертації, спрямованої на вирішення важливої **науково-практичної задачі** – підвищення енергоефективності експлуатації відцентрових насосів, які працюють на мережу зі змінним гідравлічним опором за рахунок оптимального вибору параметрів насоса та способів його регулювання залежно від умов експлуатації. Вирішення цієї задачі дозволяє уточнити вимоги до форм напірних та енергетичних характеристик насосів і вдосконалити методи їх проектування з урахуванням умов експлуатації систем подачі та розподілу води та методик вибору насосів і систем їх регулювання.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася 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: “Дослідження нетрадиційних шляхів перетворення енергії в рідині і газах та створення на їх основі прогресивного обладнання для гідросистем” (№ ДР 0106U001935), “Дослідження робочого процесу теплогенеруючих агрегатів багатофункціонального призначення та розробка на

їх основі енерго- та ресурсозберігаючого обладнання” (№ ДР 0109U001381), “Розробка науково-методичних основ проектування енергетичних машин та установок” (№ ДР 0106U001935), а також у рамках госпдоговірної роботи СумДУ (замовник КП “Міськводоканал”, м. Суми) “Розробка заходів з економії електричної енергії шляхом оптимізації подачі води споживачам Курського мікрорайону м. Суми та узгодження роботи насосних агрегатів водонасосної станції Тополянського водозабору і потреб водопровідної мережі”. Здобувач був виконавцем зазначених робіт.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення енергетичної ефективності експлуатації відцентрових насосів при роботі на гідравлічну мережу зі змінним у часі опором за рахунок оптимального вибору параметрів насосів та способів їх регулювання.

Для досягнення вказаної мети поставлені та вирішені такі завдання:

- дослідити закономірності зміни параметрів гідравлічної мережі зі змінним у часі опором (на прикладі системи подачі та розподілу води житлово-комунального господарства), визначити параметри та способи регулювання і показники узагальненої оцінки економічності системи з відцентровими насосами у її складі;

- визначити номінальні параметри насоса з урахуванням закономірностей зміни характеристики гідравлічної мережі для забезпечення мінімального енергоспоживання;

- встановити раціональні способи регулювання систем подачі та розподілу води зі змінним у часі гідравлічним опором та визначити вплив характеру розподілу навантаження насоса у часі при застосуванні обраних способів регулювання на енергоспоживання насосів;

- дослідити вплив нестационарних явищ у мережі на характер робочого процесу відцентрового насоса та оцінити зумовлені цим втрати енергії;

- розробити методику вибору номінальних параметрів насосного обладнання та способів регулювання при його експлуатації у мережах зі змінним у часі опором та вимоги щодо їх проектування.

**Об’єктом дослідження** є робочий процес відцентрових насосів, які працюють у складі гідравлічної мережі зі змінним опором у часі.

**Предметом досліджень** є параметри робочого процесу та залежності енергетичних показників роботи відцентрових насосів при їх експлуатації в умовах змінного у часі опору гідравлічної мережі.

**Методи досліджень.** Основними методами досліджень були: системний аналіз, який дозволив виконати декомпозицію системи подачі та розподілу води, методи теорії турбомашин, механіки рідини та газу, математичного моделювання, за допомогою яких побудовані математичні моделі робочого процесу, що використовувалися для визначення характеристик насосного агрегату та її складових і для оцінки нестационарних процесів; методи теорії оптимізації, на підставі яких були визначені оптимальні параметри експлуатації відцентрових насосів. Експериментальні дослідження проводилися на основі загальноновизнаних методик на насосних станціях систем подачі та розподілу води житлово-комунального господарства м. Суми, результати узагальнені методами статистичної обробки даних.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

- вперше обґрунтовано застосування впорядкованої діаграми подачі відцентрових насосів, яка враховує змінні у часі гідромеханічні параметри гідравлічної мережі протягом певного відрізка часу, і дозволяє визначати енергетичну ефек-

тивність їх роботи;

- удосконалені математичні моделі робочого процесу відцентрових насосів, які на відміну від відомих комплексно враховують характеристики насоса, гідравлічної мережі зі змінним у часі опором, привода насоса та способів регулювання (змінною частоти обертання ротора насоса та кількістю одночасно працюючих насосів), що вперше дозволило досліджувати режими роботи відцентрових насосів при їх експлуатації, визначити номінальні параметри та раціональні напірні характеристики за критерієм мінімуму енергоспоживання;

- одержала подальший розвиток і поглиблення математична модель робочого процесу відцентрового насоса, який працює на мережу зі змінним у часі опором, з урахуванням нестационарності його роботи, що дозволило оцінити величину додаткових втрат енергії у насосі та мережі;

- отримані нові аналітичні залежності для визначення величини споживання енергії насосом при його роботі на мережу зі змінним опором у часі, які відрізняються врахуванням упорядкованої діаграми подачі відцентрових насосів протягом певного відрізка часу, форми і параметрів їх енергетичних характеристик.

**Практичне значення одержаних результатів** для насособудування полягає у такому:

- запропоновано новий показник узагальненої оцінки економічності роботи системи подачі та розподілу води зі змінним у часі гідравлічним опором з відцентровими насосами у її складі, який дозволяє кількісно оцінити ефективність її експлуатації;

- встановлені діапазони ефективного застосування різних способів регулювання відцентрових насосів, що працюють у гідравлічних мережах зі змінним у часі опором;

- розроблені методики автоматизованого вибору відцентрових насосів при різних значеннях ступеня нерівномірності їх подачі у часі;

- встановлені вимоги до форми напірних та енергетичних характеристик відцентрових насосів відповідно до способів їх регулювання для систем подачі та розподілу води житлово-комунального господарства.

Основні результати дисертації у вигляді методики вибору відцентрового насоса для систем водопостачання житлово-комунального господарства, алгоритму вибору їх раціональних характеристик і методики математичного моделювання робочих процесів для дослідження режимів роботи відцентрових насосів були впроваджені на КП «Міськводоканал» (м. Суми), КП «Кременчукводоканал» (м. Кременчук), ВАТ «Сумський Промпроект» та в навчальний процес СумДУ при викладанні дисциплін «Гідродинамічні машини і передачі», «Насосні станції» для студентів спеціальності 7(8).090209 «Гідравлічні та пневматичні машини» та «Енергозбереження, діагностика, відновлення в гідро- і пневмосистемах», «Математичні методи та моделі енергетичного обладнання в розрахунках на ЕОМ», «Гідропневмосистеми» для студентів спеціальності 7.000008 «Енергетичний менеджмент».

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. Серед них: розробка математичної моделі роботи відцентрових насосів при різних способах регулювання; розробка алгоритмів чисельних методів для дослідження роботи відцентрових насосів, які працюють на мережу зі змінним у часі опором; обґрунтування планів і проведення дослідів; обробка та узагальнення результатів; участь у впровадженні результатів досліджень. Постановка завдань досліджень, аналіз і обговорення

отриманих результатів виконувалися здобувачем спільно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертації доповідались і обговорювалися на: Міжнародних науково-технічних конференціях Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики “Промислова гідравліка і пневматика” (м. Мелітополь, 2007 р., 2010 р., м. Львів, 2009 р.); IV Міжнародній науково-практичній конференції “Екологія. Енергозбереження. Економіка” (м. Суми, 2007р.); Міжнародних науково-практичних конференціях “Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізації” (м. Кременчук, 2008 – 2010 рр.); Міжнародних науково-практичних конференціях “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці” (м. Київ, 2008 р., 2010 р., м. Чернівці, 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Вдосконалення турбоустановок методами математичного та фізичного моделювання” (м. Харків, 2009 р.); Міжнародній науково-технічній конференції “Силова електроніка та енергоефективність 2009” (м. Алушта, 2009 р.); науково-технічних конференціях викладачів, співробітників, аспірантів та студентів СумДУ (2006 – 2010 рр.). У повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на пленарному засіданні XI Міжнародної науково-технічної конференції Асоціації фахівців промислової гідравліки і пневматики (м. Мелітополь, 2010 р.).

**Публікації.** Матеріали дисертаційної роботи відображені в 14 статтях у наукових фахових виданнях з переліку, затвердженого ВАК України. Матеріали дисертаційної роботи використовувались у звітах з НДР.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел інформації. Загальний обсяг роботи становить 191 сторінка, з них 56 рисунків по тексту, із яких 1 на окремій сторінці, 8 таблиць по тексту, 1 таблиця на окремій сторінці, 5 додатки на 18 сторінках, списку використаних джерел інформації з 121 найменування на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** до дисертації містить обґрунтування актуальності теми, характеристики об'єкта, мети і предмета дослідження, опис основних наукових результатів дослідження, їх новизни та практичної цінності, та відомості про впровадження результатів і апробацію роботи.

**У першому розділі** виконано аналітичний огляд тенденцій розвитку, технічного рівня і практики застосування відцентрових насосів (ВЦН), які експлуатуються у складі гідравлічних мереж зі змінним у часі опором. Встановлено, що експлуатація ВЦН у таких умовах характерна для систем подачі та розподілу води (СПРВ) житлово-комунального господарства (ЖКГ) і призводить до зниження надійності, довговічності і економічності їх роботи. Традиційно використовувані способи регулювання, такі як дроселювання і байпасування, пов'язані з непродуктивними втратами енергії, їх реалізація відносно маловитратна і не потребує складних технічних рішень, тому і застосовується у вітчизняній практиці.

Вибір насоса з необхідним робочим діапазоном напірної характеристики ґрунтується на розрахунку опору гідравлічної мережі за умови забезпечення мінімально необхідного напору в контрольних точках, довгостроковому прогнозі потреби у воді з урахуванням перспективних будівництв, нормах водоспоживання на одного мешканця тощо. Неточності розрахунку, зміни в гідравлічній мережі при первин-

ному монтажі й у процесі експлуатації призводять до зміни її опору і, відповідно, відмінності розрахункового і фактичного режимів роботи насоса. Навіть якщо розрахунок зроблений вдало, можна говорити тільки про досягнення оптимального середньоексплуатаційного (за термін служби) ККД насоса, який заздалегідь буде нижчий за його паспортне значення. Проте оптимізувати вибір насоса навіть за середньоексплуатаційним ККД, зазвичай, не вдається через велику кількість чинників, що змінюються. Найбільш значущий із них є нерівномірність водоспоживання, яка має випадковий характер (у кожний інший момент часу кількісний і якісний склад споживачів води відрізняється від попереднього).

Проведений аналіз науково-технічних публікацій дозволив установити, що згідно зі світовим тенденціями (Еurosump) зниження обсягів енергоспоживання для насосного обладнання передбачено на рівні 40 %, у тому числі за рахунок збільшення максимального рівня ККД насоса (до 3 %), узгодження параметрів мережі і насоса (близько 4 %), адаптації (в межах 4 %) і регулювання (18 – 20%) насоса, відповідно до режимів його експлуатації протягом усього життєвого циклу, та оптимізації в цілому СПРВ (10 – 12 %).

Питання підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів було предметом досліджень багатьох авторів. Значний внесок у вирішення цієї проблеми внесли М.М. Абрамов, М.М. Андріяшев, Т.М. Башта, А.Г. Євдокимов, А.П. Мережков, Г.І Ніколадзе, І.В. Ніколенко, С.С. Руднев, В.Я. Хасілев, П.Д. Хорунжий, Ф.А. Шевелєв та інші. Вирішення задачі вибору номінальних параметрів насоса базується на мінімізації вартості життєвого циклу насоса, яка складається з початкової вартості насоса, вартості його монтажу, експлуатації, технічного обслуговування, утилізації, вартості спожитої електроенергії та видатків на охорону навколишнього середовища. Видатки на електроенергію для приводу насоса, є найбільш значимими у вартості життєвого циклу і залежать від його подачі, а отже закономірності зміни гідравлічних параметрів мережі зі змінним опором у часі є вихідними даними для вирішення задачі мінімізації енергоспоживання. За існуючими рекомендаціями насоси вибираються на максимальне значення водоспоживання з використанням коефіцієнтів добової нерівномірності водоспоживання, які, по суті, є коефіцієнтами запасу до усередненого водоспоживання і не відображають дійсної зміни режиму водопостачання впродовж доби.

При експлуатації систем подачі та розподілу води, а особливо СПРВ ЖКГ, їх параметри безперервно змінюються у часі, що обумовлено відключенням окремих споживачів, зміною місцевих гідравлічних опорів у споживачів (регулювання кранів, засувок), відключенням насосних агрегатів, аварійними ситуаціями тощо. Теорія неусталеного руху рідини (гідравлічного удару) закладена М.Є. Жуковським і знайшла своє продовження в роботах І.А. Чарного, Б.Ф. Лямаєва, К.П. Вишневського, Б.Й. Боровського, Б.В. Овсяннікова, R. Angus, L. Allievi, J. Fox, O. Schnyder та інших. Однак розрахунок перехідних процесів у СПРВ зі змінним опором гідравлічної мережі знаходиться на стадії становлення і досі не отримав широкого застосування. Втрати енергії на неусталених режимах роботи СПРВ досліджені недостатньо.

Проведена систематизація чисельних способів регулювання насосних установок дозволила встановити, що ефективність їх застосування оцінюється переважно на якісному рівні, крім того, немає ефективної оцінки придатності кожного з них для потреб галузі водопостачання ЖКГ.

Система подачі і розподілу води як технічна система, що характеризується складними взаємозв'язками між елементами, перетворенням енергії з одного виду в інший, невизначеністю технічних характеристик елементів, безліччю робочих станів як кожного елемента, так і системи в цілому, потребує цілісного системного аналізу. Необхідно відзначити, що у наявній науково-технічній літературі з даного напрямку, прикладів застосування системного аналізу як методики дослідження технічних систем недостатньо, а в галузі насособудування зазначені методи майже не використовуються.

Вирішення цих питань визначило мету і завдання дослідження, які наведені у загальній характеристиці роботи. Сформульована актуальна науково-практична задача – підвищення енергоефективності експлуатації відцентрових насосів, що працюють на мережу зі змінним гідравлічним опором за рахунок оптимального вибору параметрів насоса та способів його регулювання залежно від умов експлуатації.

У другому розділі наведені результати системного аналізу СПРВ, модель функціонування якої подана на рис. 1. На першому етапі аналізу система подачі води розглядалася як “чорна скриня”, були визначені її головна функція, вхідні та вихідні елементи (параметри), ресурси та результат, критерії та показники ефективності функціонування.

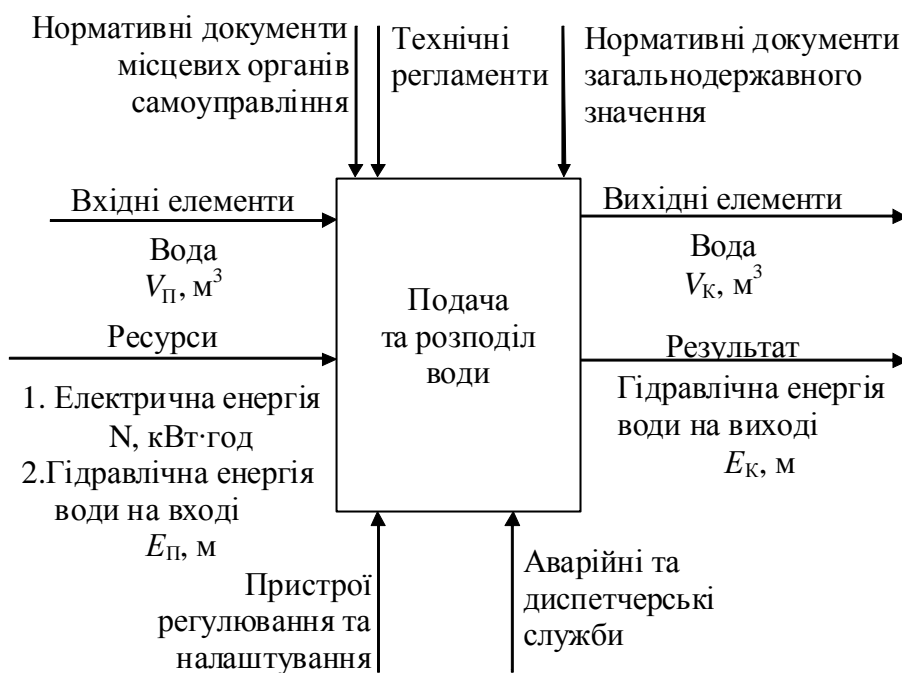


Рис. 1. Функціональна схема системи подачі і розподілу води

При визначенні критеріїв оцінки функціонування системи використовувалися різні комбінації вхідних, вихідних елементів, ресурсів та результату. Як інтегральний показник економічності СПРВ запропоновано показник енергоефективності системи  $EE$  – відношення об'єму отриманої споживачем води ( $V_k$ ) до затраченої електричної енергії на привод двигунів ( $N$ ):

$$EE = V_k / N. \quad (1)$$

На другому етапі системного аналізу побудована структурно-функ-

ціональна схема, визначені призначення і характеристики кожної підсистеми та встановлені взаємозв'язки між ними. Досліджена СПРВ (рис. 2), у якій: 1 – джерело гідравлічної енергії, місце забору води (резервуар, водоводи низького тиску тощо); 2 – водоводи системи подачі та розподілу води на насосну станцію із запірно-регульовальною арматурою; 3 – мережа електроживлення; 4 – електричний привод насосів (синхронні чи асинхронні електричні двигуни); 5 – насоси насосної станції; 6 – водоводи системи подачі та розподілу води до споживача із запірно-регульовальною арматурою; 7 – споживач води.



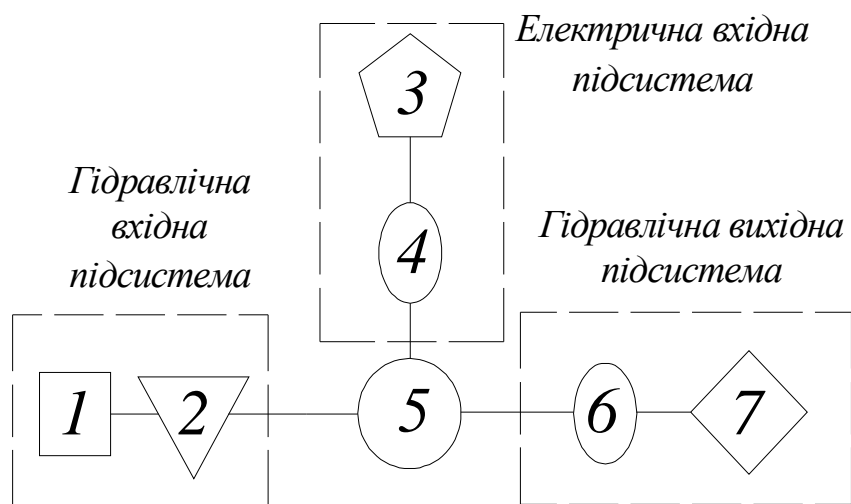


Рис. 2. Структурна схема системи подачі та розподілу води

Основними елементами СПРВ є насоси насосної станції, відносно них третій (мережа електроживлення) та четвертий (електричний привод) елементи у сукупності складають вхідну електричну підсистему. Перший та другий елементи у сукупності складають гідравлічну вхідну підсистему. Шостий (мережа водоводів із запірно-регулювальною арматурою) та сьомий

(споживач) елементи входять до складу гідравлічної вихідної підсистеми.

На основі системного аналізу встановлено наступне: зміна витрати у споживачів спричиняє зміну подачі насосної станції, що зумовлює зміну як тиску у мережі, так і напору насосної станції; керування гідравлічними параметрами напірної мережі є цілеспрямованою змінною  $H(Q)$  характеристики насосної станції; визначення способів регулювання зводиться до розгляду та оцінки  $H(Q)$  характеристик насосів; споживач має власну характеристику в координатах  $H(Q)$ , функціонування СПРВ націлене на забезпечення вказаної характеристики; параметри потоку води на виході із системи є об'єктом регулювання, а можливість забезпечення характеристики споживача є умовою придатності різних способів регулювання; за регульований параметр насосної станції обрано тиск.

Проведений аналіз можливих способів зміни режиму роботи насоса на мережу зі змінним у часі опором СПРВ ЖКГ показав, що у зв'язку з необхідністю дотримання санітарно-гігієнічних норм непридатними є способи впливу на перекачуване середовище. Частина з розглянутих способів є не способами регулювання, а способами налаштування насоса на конкретні параметри (підрізка робочого колеса, затиловка тощо), інша частина непридатна за динамічними характеристиками або глибиною регулювання (зміна кутів установки лопаток випрямних та напрямних апаратів, наповнення та опорожнення гідромуфти тощо), частина з них не дозволяє підтримувати у споживача тиск у заданому діапазоні. Придатними для СПРВ є ступеневе регулювання (регулювання кількістю паралельно працюючих насосних агрегатів) та частотне регулювання електропривода (зміна частоти обертання робочого колеса насоса).

Для визначення закономірностей зміни параметрів гідравлічної мережі зі змінним у часі опором експериментальні дослідження проводилися на реально функціонуючих насосних станціях третього підйому СПРВ м. Суми. Під час проведення цих промислових досліджень було обстежено 26 насосних станцій третього підйому. Результати, отримані на основі експерименту, є достовірними, оскільки дослідження проводилося на основі загальноприйнятої методики з використанням повірених приладів необхідного класу точності, похибки вимірювання яких знаходились у допустимих межах (ДСТУ 6134-2007). За результатами експериментальних досліджень отримані залежності зміни основних параметрів насоса від часу (рис.3).

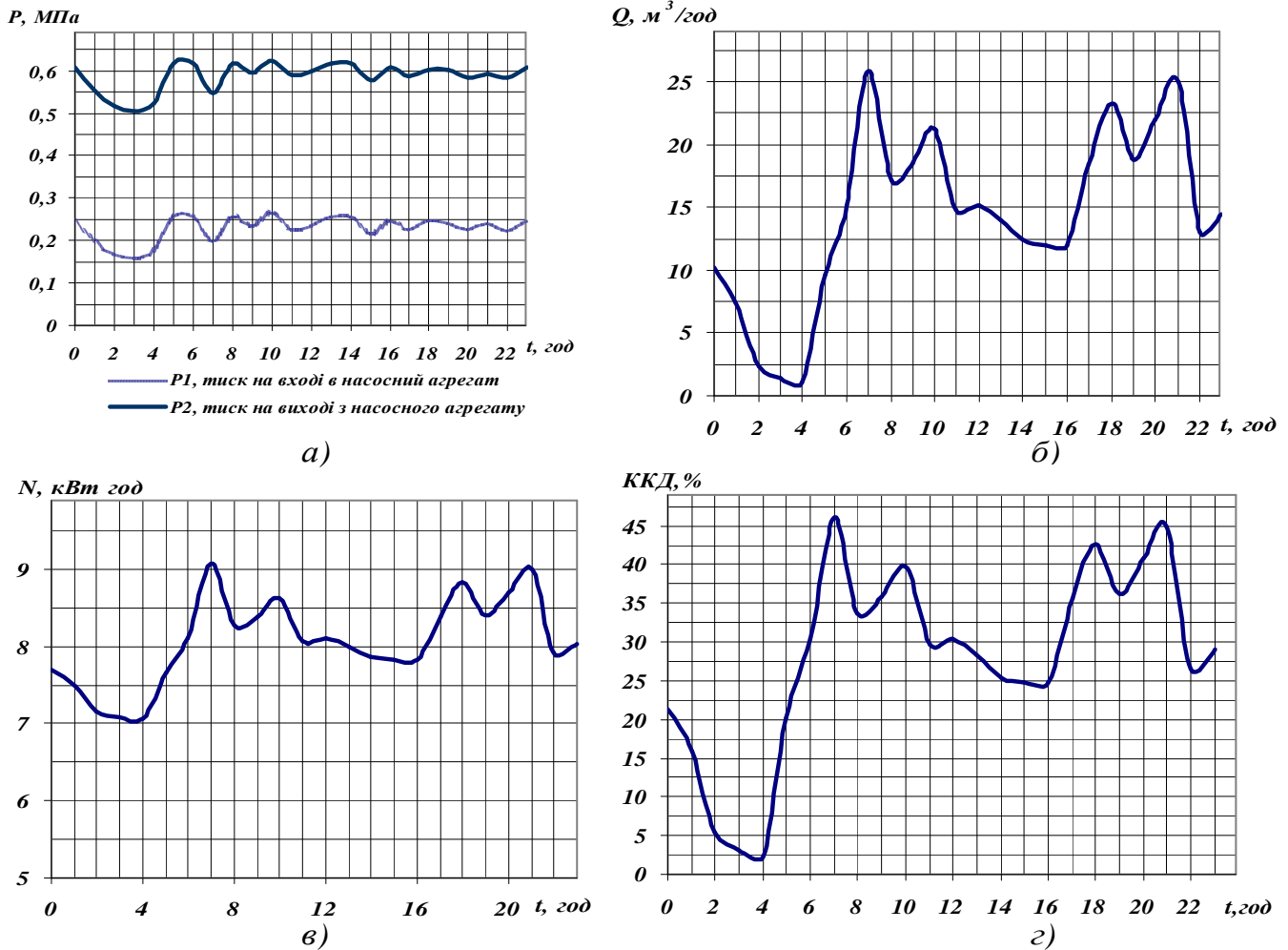


Рис. 3. Залежність зміни основних параметрів насоса у часі (центральный тепловий пункт № 5, розташований за адресою м. Суми по вул. Ковпака 47): а) тиску на вході та на виході; б) подачі; в) споживаної електроенергії; г) ККД насоса

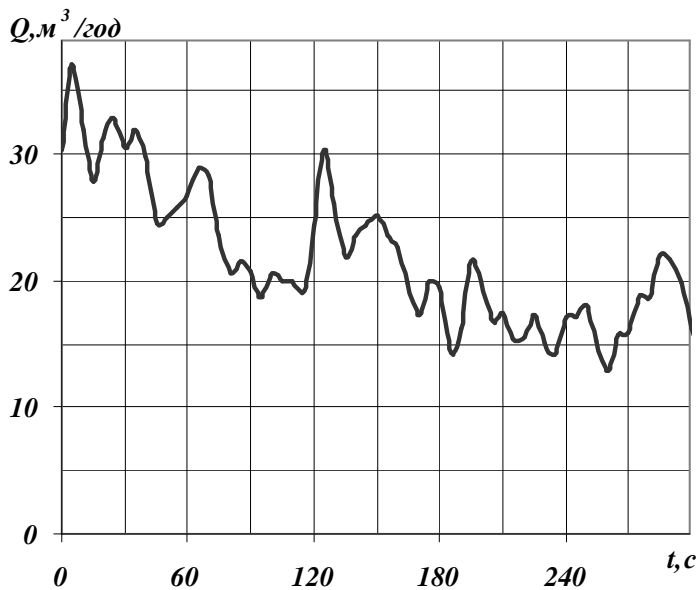


Рис. 4. Деталізований графік зміни водопостачання впродовж 5 хв

Вимірювання подачі проводилися за допомогою ультразвукового портативного витратоміра-лічильника з реєстрацією даних з інтервалом 2 секунди впродовж 24 годин. На рис. 4 зображений деталізований графік зміни водоспоживання цього самого об'єкта протягом 5 хвилин, який підтверджує складний характер процесу. Режими водоспоживання характеризуються зазвичай добовими, тижневими, місячними, річними графіками водоспоживання, які визначаються багатьма, не залежними один від одного, чинниками: кліматичними, погодними, культурно-соціальними умовами, режимами роботи підприємств тощо.

Під час дослідження режимів роботи насосів за тривалий проміжок часу добовими графіками водоспоживання користуватися незручно, оскільки вони

суттєво відрізняються один від одного за днями тижня, порами року та ін. Їх практично неможливо описати математичними залежностями. Із цих причин для узагальненого аналізу режимів роботи насосів запропоновано застосування впорядкованої діаграми подачі насосів та її апроксимацію експоненціальною функцією типу  $Q(t) = ae^{bt}$ , де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимації, що характеризують графік добової подачі ВЦН. Під впорядкованою діаграмою подачі насосів розуміють криву, що сполучає розташовані у порядку зростання ординати добових графіків подачі насоса за тривалий проміжок часу, наприклад рік, місяць, добу. Коефіцієнт  $b$  характеризує ступінь нерівномірності подачі насоса, при  $b = 0$  подача насоса є сталою у часі. На рис. 5 поданий реальний графік добового водопостачання та впорядкована діаграма подачі насосів.

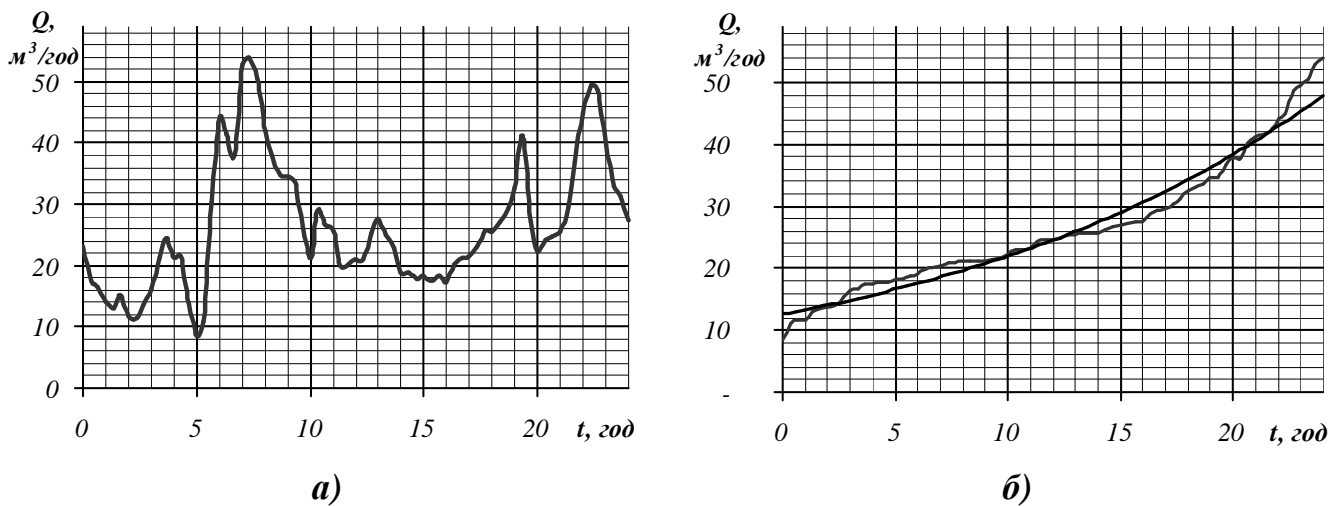


Рис. 5. Добова нерівномірність водопостачання:  
а) фактична; б) впорядкована діаграма подачі насосів

**Третій розділ** присвячено розв'язанню задачі визначення оптимальної кількості та параметрів насосів, які працюють на мережу зі змінним гідравлічним опором у часі, для забезпечення мінімального споживання енергії насосною установкою при різних способах її регулювання.

Характеристика мережі як залежність між напором  $H$  і витратою рідини  $Q$  визначалася як

$$H = a_m + c_m \cdot Q^2, \quad (2)$$

де  $a_m$  – статичний напір, зумовлений різницею геодезичних відміток насоса і споживача;  $c_m$  – опір гідравлічної мережі.

Напірна характеристика насоса для моделювання найбільш імовірних режимів роботи визначалася як

$$H = a_n + c_n \cdot Q^2, \quad (3)$$

де  $a_n$ ,  $c_n$  – константи, що залежать від конструктивного виконання насоса, і розраховані за паспортною характеристикою шляхом апроксимації за методом найменших квадратів.

Коефіцієнти апроксимації  $a_n$ ,  $c_n$  напірної характеристики насоса визначені через координати базової точки (в якій параметри насоса  $H_0$  і  $Q_0$ ) і тангенс кута дотичної в цій точці (рис. 6). Напірна характеристика насоса набула вигляду

$$H(Q) = (H_0 - \frac{tg\gamma}{2} \cdot Q_0) + \frac{tg\gamma}{2 \cdot Q_0} \cdot Q^2. \quad (4)$$

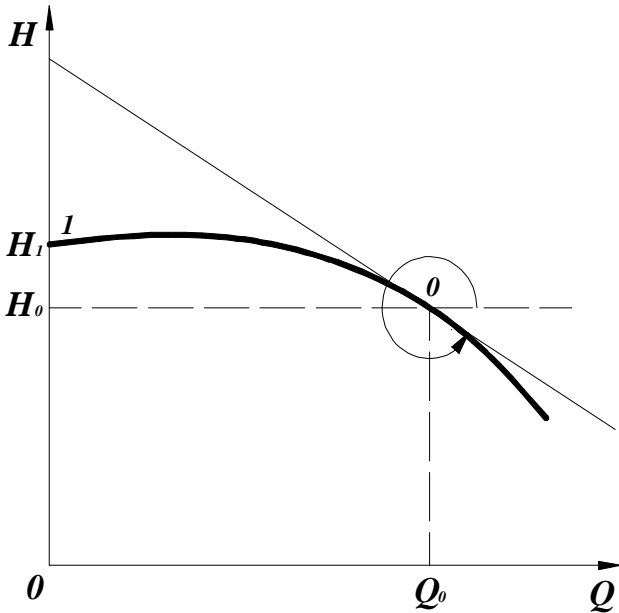


Рис. 6. Параметри характеристики насоса

Аналітичну залежність ККД насоса від його витрати визначена як

$$\eta = a_{\eta} + b_{\eta} \cdot Q + c_{\eta} \cdot Q^2, \quad (5)$$

де  $a_{\eta}$ ,  $b_{\eta}$ ,  $c_{\eta}$ , – константи, що залежать від конструктивного виконання насоса.

Коефіцієнти апроксимації  $a_{\eta}$ ,  $b_{\eta}$ ,  $c_{\eta}$  визначили за даними каталогу (максимальне значення ККД  $\eta_m$  і відповідне йому значення витрати  $Q_m$ ), отримали

$$\eta = 2 \cdot \frac{\eta_m}{Q_0} \cdot Q - \frac{\eta_m}{Q_0^2} \cdot Q^2 = \frac{\eta_m \cdot Q \cdot (2 \cdot Q_0 - Q)}{Q_0^2}. \quad (6)$$

Для обґрунтування прийняття різних проектних рішень при виборі оптимальних параметрів насоса за основний критерій взяли величину спожитої електроенергії  $N$ , яка визначалася як

$$N(t) = \int_0^t \frac{\rho g Q(t) H(t)}{\eta(t)} dt. \quad (7)$$

Значення спожитої електроенергії впродовж розглядуваного проміжку часу  $t_1$  визначене із залежностей (4), (6), (7) та залежності витрати від часу  $Q(t) = ae^{bt}$ :

$$N(t) = \frac{\rho g}{\eta_m} \int_0^{t_1} \frac{\left( H_m - \frac{tg\gamma}{2} Q_m + \frac{tg\gamma}{2Q_m} a^2 e^{2bt} \right) Q_0^2}{2Q_0 - ae^{bt}} dt. \quad (8)$$

Використана номінальна подача насоса  $Q_0 = kQ_m$ , де  $k$  – відносна до максимального водопостачання подача. Відносне енергоспоживання  $\bar{N}$  – відношення енергоспоживання при довільних параметрах насоса  $N$  до енергоспоживання при виборі насоса на максимальне значення водоспоживання визначене таким чином:

$$\bar{N} = \frac{\int_0^{t_1} \frac{(H_m - \frac{tg\gamma}{2} ae^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} ae^{b(2t-t_1)}) k^2 ae^{2bt_1}}{2ke^{b \cdot t_1} - e^{bt}} dt}{\int_0^{t_1} \frac{(H_m - \frac{tg\gamma}{2} ae^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} ae^{b(2t-t_1)}) ae^{2bt_1}}{2e^{bt_1} - e^{bt}} dt}. \quad (9)$$

Запропоновано обирати параметри насоса, при яких, досягається мінімальне значення  $\bar{N}$  з умови

$$\frac{d\bar{N}}{dk} = 0. \quad (10)$$

Аналіз залежностей (рис. 7) показує, що різним значенням ступеня нерівномірності подачі насоса відповідають різні значення номінальної подачі  $Q_0$  для забезпечення мінімального енергоспоживання. Оптимізовані чисельно за критерієм (10) номінальні параметри обраних насосів на рис.7 показані лінією  $a$ .

Другим запропонованим способом підвищення енергоефективності експлуатації насосів у СПРВ зі змінним опором гідравлічної мережі є використання ступеневого

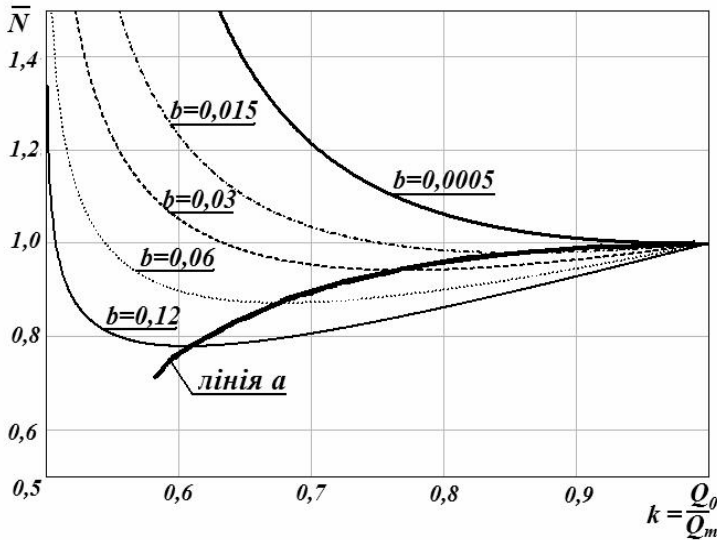


Рис. 7. Зміна відносного енергоспоживання від ступеню нерівномірності подачі при значенні кута нахилу напірної характеристики насоса  $\gamma = 5^0$

$$LCCD = C_{ic} + C_{in} + \sum_{t=1}^{T_{cl}} \frac{C_e + C_o + C_m}{(1+r)^t} + \frac{C_d}{(1+r)^{T_{cl}}}, \quad (11)$$

де  $C_{ic}$  – початкова вартість;  $C_{in}$ ,  $C_o$ ,  $C_m$  – витрати на монтаж, експлуатацію та технічне обслуговування насоса відповідно;  $C_e$  – вартість спожитої електроенергії приводом насоса;  $C_d$  – вартість утилізації насосної установки;  $t$  – крок розрахункового періоду;  $T_{cl}$  – термін служби;  $r$  – норма дисконту. Для насосних станцій третього (ступень нерівномірності подачі  $b = 3$ ) визначено раціональну кількість насосного обладнання у три насоса (рис. 8 і 9).

$LCCD$ , тис.грн.

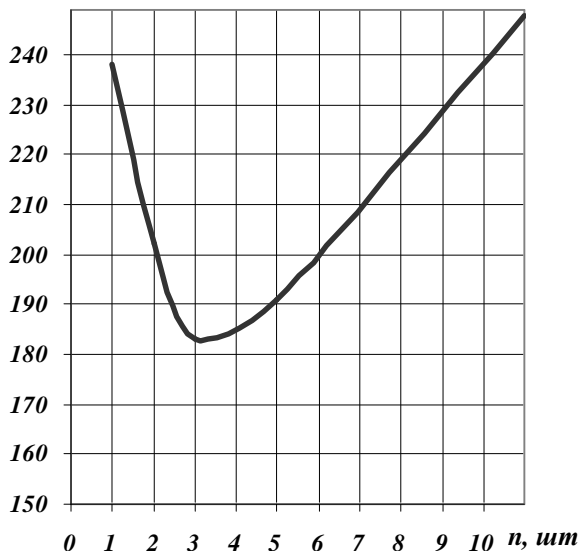


Рис. 8. Залежність дисконтованої вартості життєвого циклу насосної установки від кількості насосів

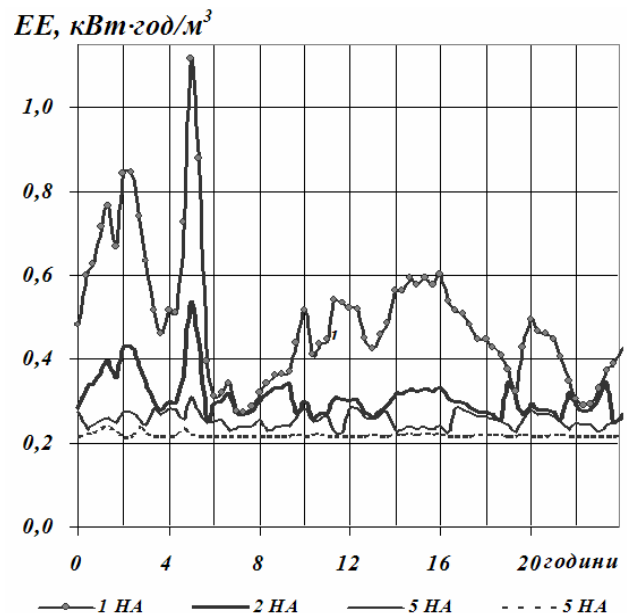


Рис. 9. Енергоємність насосної станції при різній кількості насосів

регулювання (змінна кількість одночасно працюючих насосів). Математична модель роботи ВЦН у складі СПРВ для визначення оптимальної кількості робочих насосів сформована з умови забезпечення сталого напору у споживача та рівнянь (2) – (7). Встановлено, що при ступеневому регулюванні необхідно застосовувати насоси з пологими напірними характеристиками. Кількість насосів при ступеневому регулюванні має оптимальне значення, яке отримане шляхом мінімізації дисконтованих витрат вартості життєвого циклу насосної установки ( $LCCD$ )

Третім запропонованим способом підвищення економічної ефективності СПРВ є використання частотного регулювання електроприводу (зміни частоти обертання робочого колеса насоса). Математична модель роботи насоса при даному

способі регулювання базується на умові забезпечення сталого тиску у споживача та на основі теорії подібності гідромашин враховує зміну частоти обертання ротору насоса в рівняннях (1) – (7).

Для різних робочих режимів енергетичні характеристики ВЦН, при його частотному регулюванні, описуються залежностями (12) – (14):

$$\frac{n_1}{n_0} = \sqrt{\frac{2 \cdot H_0 \cdot c_M \cdot Q_0 - \operatorname{tg}(\gamma) \cdot (H_0 - a_M)}{(2 \cdot H_0 - \operatorname{tg}(\gamma) \cdot H_0) \cdot Q_0 \cdot c_M}}, \quad (12)$$

$$\frac{\eta_1}{\eta_0} = \frac{n_0}{n_1} \cdot \frac{\left(2Q_m - \frac{n_0}{n_1} \cdot Q\right)}{(2Q_m - Q)}, \quad (13)$$

$$\frac{N_1}{N_0} = \left(\frac{2 \cdot H_0 \cdot c_M \cdot Q_0 - \operatorname{tg}(\gamma) \cdot (H_0 - a_M)}{(2 \cdot H_0 - \operatorname{tg}(\gamma) \cdot H_0) \cdot Q_0 \cdot c_M}\right)^{\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

Встановлено, що найбільший економічний ефект при частотному регулюванні можна отримати за умови наявності максимально можливої крутизни напірної характеристики насоса, при цьому кут нахилу дотичної до напірної характеристики при оптимальній подачі може бути критерієм доцільності застосування частотного регулювання. Аналіз рис. 10, 11 показує, що при частотному регулюванні доцільно застосовувати насоси з напірними характеристиками, кут нахилу дотичної в номінальному режимі яких більше  $30^\circ$ .

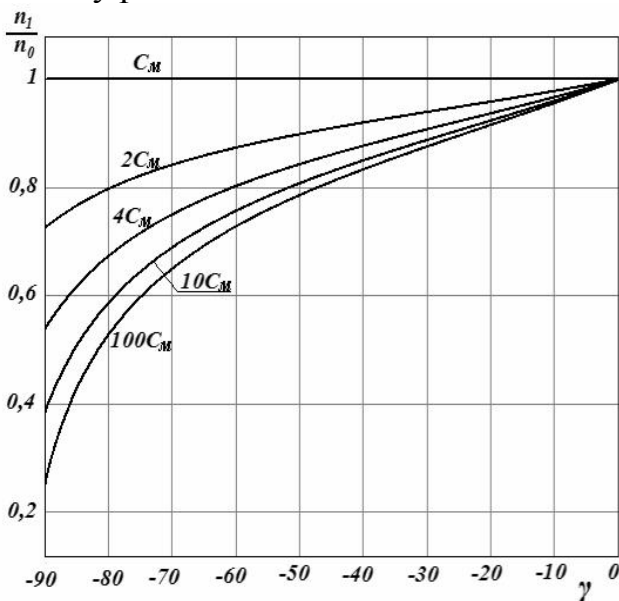


Рис. 10. Залежності зміни відносної частоти обертання насоса при частотному регулюванні від кута нахилу характеристики насоса ( $\gamma$ ) при різних значеннях опору мережі ( $c_M$ )

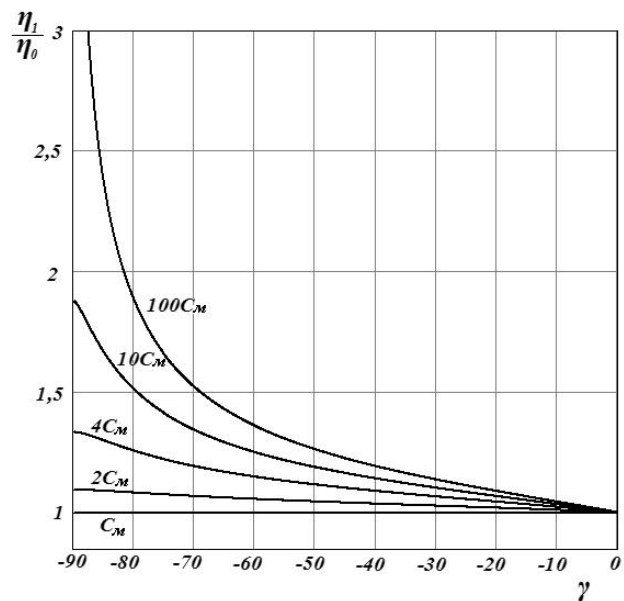


Рис. 11. Залежність ефективності (відносного ККД) використання енергії при частотному регулюванні від кута нахилу характеристики насоса ( $\gamma$ ) при різних значеннях опору мережі ( $c_M$ )

Подано результати дослідження роботи відцентрових насосів у нестационарному режимі. Математичну модель робочого процесу відцентрового насоса в нестационарному режимі розроблено з використанням комбінованого підходу Г.Ю. Степанова щодо розподілу моменту привода  $M_{\text{привода}}$  на момент на дискове тертя  $M_{\text{дт}}$  і момент потоку рідини  $M_{\text{поток}}$  і підходу Б.Й. Боровського, Б.В. Овсянникова щодо виділення окремих складових, які характеризують різні аспекти цього процесу.

Розроблена математична модель роботи відцентрового насоса складається з рівнянь: моментів

$$M_{\text{привода}} = M_{\text{дт}} + M_{\text{поток}}; \quad (15)$$

моменту на валу насоса

$$M_{\text{н}} = M_{\text{дт}} + \rho \cdot Q \cdot [\overline{V_u \cdot r_2} - \overline{V_u \cdot r_1}] + I_p \frac{d\omega}{dt} + C \frac{dQ}{dt} + D \frac{d\omega}{dt}; \quad (16)$$

напору насоса

$$H(t) = \frac{P_2(t) - P_1(t)}{\rho \cdot g} + \frac{V_2^2(t) - V_1^2(t)}{2 \cdot g} - (I_{\text{р вх}} + I_{\text{р вих}} + B) \cdot \frac{dQ}{dt} + A \cdot \frac{d\omega}{dt}; \quad (17)$$

потужності на валу насоса

$$N_{\text{н}} = N_{\text{уст}} + \omega \left[ (I_p + D) \frac{d\omega}{dt} + C \frac{dQ}{dt} \right]. \quad (18)$$

У формулах (16) – (18)  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора насоса;  $P$  і  $V$  – відповідно тиск та швидкість потоку рідини;  $I_p$  – момент інерції рідини в насосі; 1, 2 – вхідні і вихідні перерізи насоса відповідно;  $u$  – коловий напрямок;  $r$  – радіус;  $A, B, C, D$  – коефіцієнти, отримані для робочого колеса з циліндричними лопатями сталої ширини і сталим кутом нахилу лопаті.

Модель робочого процесу спільної роботи насоса та мережі отримана за умови рівності напорів на виході із насоса і вході у трубопровід та балансу обертових моментів ротора насоса і вала електродвигуна:

$$\begin{cases} H_{\text{н}} = H_{\text{м}} \\ I \cdot \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{ед}} - M_{\text{н}} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_{\text{н}} \cdot n^2 + b_{\text{н}} \cdot n \cdot Q + c_{\text{н}} \cdot Q^2 = \left( \lambda \cdot \frac{L}{d} + \zeta \right) \cdot \frac{(Q/S)^2}{2 \cdot g}, \\ \frac{\pi \cdot \Delta n}{30 \cdot \Delta t} = \frac{2 \cdot M_{\text{max}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} + \frac{30 \cdot (a_{\text{н}} \cdot n^2 + b_{\text{н}} \cdot n \cdot Q + c_{\text{н}} \cdot Q^2)}{\pi \cdot n}, \end{cases} \quad (19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного тертя в квазістаціонарному режимі;  $l, d$  – геометричні параметри трубопроводу;  $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору;  $s$  – коефіцієнт ковзання електродвигуна. Реалізація моделі виконувалася методом скінчених різниць.

Початкові умови отримано з опису попереднього усталеного руху води в трубопроводі. У якості граничних умов на кінці трубопроводу, де знаходиться споживач, взято залежність зміни витрати води від часу, отриману експериментально.

На основі моделювання робочих процесів попередньо обстежених об'єктів оцінено складові потужності насоса на неусталених режимах його роботи. Встановлено, що втрата енергії в насосі, яка пов'язана з нестационарністю його роботи, становить близько 6%, та визначено складову гідравлічних втрат у мережі на неусталених режимах, яка становить у середньому близько 1,5 % від номінального напору насоса та на пікових змінах режимів – 15%.

**У четвертому розділі** розроблено методику визначення оптимальної кількості насосів і їх параметрів з використанням упорядкованої діаграми подачі насосів у безрозмірних координатах, що дає можливість порівняння різних варіантів організації подачі води в мережах зі змінним у часі гідравлічним опором.

Побудова таких діаграм базується на таких засадах: площа під впорядкованою діаграмою дорівнює 1, а числові значення на осі абсцис змінюються в інтервалі [0, 1]. Залежність водоспоживання від часу при застосуванні впорядкованої діаграми визначається як

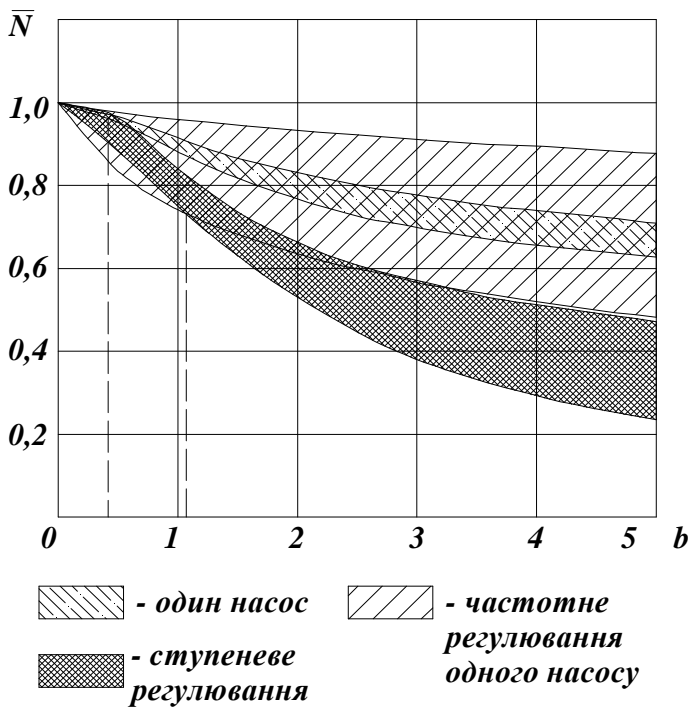


Рис. 12. Залежність відносного енергоспоживання  $\bar{N}$  від ступеня нерівномірності подачі насосної станції  $b$  при різних способах регулювання

стаціонарності мікрорайону з кількістю мешканців близько 5 тис. чол. (ступінь нерівномірності  $b = 3$ ). Значення середньоексплуатаційного ККД та енергоефективності при виборі насоса на максимальне значення водоспоживання ( $Q = Q_{max}$ ), при виборі насоса на оптимальну подачу ( $Q = 0,6 \cdot Q_{max}$ ), при частотному та ступеневому регулюванні, подано в табл. 1.

Таблиця 1

Оцінка ефективності різних способів організації водопостачання при ступені нерівномірності подачі насосної станції  $b = 3$

Способи організації водопостачання	Середньоексплуатаційний ККД, %	Середня енергоефективність, м <sup>3</sup> /кВт
Вибір насоса на максимальне значення водопостачання (база порівняння)	0,47 $\eta_{opt}$	0,34
Вибір насоса на оптимальну подачу	0,56 $\eta_{opt}$	0,40
Частотне регулювання привода насоса	0,61 $\eta_{opt}$	0,61
Ступеневе регулювання насосами	0,80 $\eta_{opt}$	0,75

Розроблено методику вибору насосного агрегату та способу його регулювання залежно від ступеня нерівномірності подачі. Основною відмінністю запропонованої методики від існуючих є врахування нерівномірності водоспоживання у часі та вибір способу регулювання з множини можливих. Схематично алгоритм підбору на-

$$Q(t) = a \cdot e^{b \cdot t} = \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{b \cdot t}. \quad (20)$$

На основі подання впорядкованих діаграм водопостачання в безрозмірних координатах встановлені діапазони застосування різних видів регулювання від значення ступеня нерівномірності подачі насоса  $b$ . Аналіз залежності відносного енергоспоживання  $\bar{N}$  від ступеня нерівномірності подачі насосної станції  $b$  при різних способах регулювання (рис. 12) показує, що одним насосом можна ефективно забезпечувати водопостачання зі ступенем нерівномірності  $b = 0 \dots 0,46$ , за допомогою частотного регулювання привода –  $b = 0,46 \dots 1,18$ , за допомогою ступеневого регулювання –  $b = 1,18 \dots 5$ . Насосні станції третього підйому переважно забезпечують водопо-



соса відповідно до ступеня нерівномірності добового графіка водопостачання представлений на рис. 13.



Рис. 13. Алгоритм вибору насоса та способу його регулювання залежно від ступеня нерівномірності водоспоживання

У випадку відсутності необхідного насосного обладнання необхідно розробляти технічні завдання на його проектування та замовляти його виробництво. При цьому в завданні необхідно передбачити спеціальні вимоги щодо параметрів напірної характеристики: для насосів без регулювання – забезпечення максимально пологої форми напірної характеристики; для насосів з частотним регулюванням при вводу – максимально крутої форми.

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена науково-практична задача – визначення шляхів підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системах зі змінним у часі гідравлічним опором за рахунок оптимального вибору параметрів насосів та способів регулювання залежно від умов експлуатації, що дозволяє підвищити середньоексплуатаційний ККД насосів та енергоефективність систем подачі та розподілу води. Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. На підставі обробки та аналізу експериментальних даних встановлено, що витрата в системах подачі та розподілу води ЖКГ має складний характер зміни в часі з періодом близько  $t_{\text{сер}} = 20$  с та середньою амплітудою  $2 \text{ м}^3/\text{год}$ . При цьому середньоексплуатаційний ККД насоса становить близько 50 % від оптимального, як наслідок – висока економічність насосів практично нівелюється низькою ефектив-

ністю їх роботи в гідравлічних мережах зі змінним у часі опором. Системним аналізом встановлено, запропоновано та обґрунтовано:

- універсальні впорядковані діаграми зміни подачі насоса, застосування яких дозволяє розробляти математичні моделі робочого процесу для проведення узагальненого аналізу режимів роботи насосів при їх експлуатації;

- наявність власної характеристики споживача  $H = f(Q)$ , яка вимагає націлити функціонування систем подачі та розподілу води на її забезпечення. Таким чином, параметри потоку на виході є об'єктом регулювання і критерієм вибору способів регулювання;

- узагальнену оцінку економічності системи водопостачання у вигляді інтегрального показника енергоефективності системи – відношення об'єму отриманої води споживачем до затраченої електричної енергії на привод електродвигунів.

2. Розв'язано задачу вибору номінальних параметрів насоса при його роботі на мережу зі змінним у часі опором, що забезпечує мінімальне споживання електроенергії. При роботі насоса на мережу встановлено мінімально можливий рівень енергоспоживання, визначено вплив різних чинників на нього; різним значенням ступеня нерівномірності подачі відповідають різні значення номінальної подачі насоса  $Q_0$ . При цьому найменше енергоспоживання досягається за умови мінімальної крутизни напірної характеристики насоса. Це дозволяє обґрунтовано проводити вибір насоса з відповідною напірною характеристикою.

3. Встановлено, що в системах подачі та розподілу води третього підйому придатними способами регулювання є частотне регулювання привода насоса та ступеневе регулювання кількістю одночасно працюючих насосів. Визначено, що найменше енергоспоживання при частотному регулюванні одного насоса забезпечується умовою наявності максимально можливої крутизни напірної характеристики насоса. При цьому кут нахилу дотичної до характеристики  $H = f(Q)$  у робочій точці необхідно використовувати як критерій доцільності застосування регулювання шляхом зміни частоти обертання робочого колеса насоса. Кількість насосних агрегатів при ступеневому регулюванні має оптимальне значення, отримане шляхом мінімізації дисконтованих витрат вартості життєвого циклу насосної установки (для насосних станцій третього підйому оптимальне значення становить три насоси).

4. На основі математичного моделювання досліджено вплив нестаціонарних явищ у мережі на характер робочого процесу відцентрового насоса, що дозволило встановити наявність додаткових втрат енергії як у самому насосі, так і в трубопроводах. Проведена оцінка складових балансу енергії насоса на неусталених режимах роботи показує, що додаткові втрати енергії становлять близько 6% на номінальному режимі. Розраховано додаткову складову гідравлічного опору мережі на неусталених режимах, яка становить у середньому близько 1,5 % втрат енергії осередненого потоку та на пікових змінах режимів до 15%, що дозволило визначити додаткові шляхи зменшення енерговитрат у системах подачі та розподілу води зі змінним у часі гідравлічним опором мережі.

5. Розроблено методику вибору насосного агрегату та способу його регулювання залежно від ступеня нерівномірності подачі, визначено діапазони раціонального застосування різних видів регулювання. Встановлено, що для насосних станцій третього підйому (ступень нерівномірності  $b = 3$ ) при виборі насоса на максимальне значення водоспоживання середньоексплуатаційний ККД становить

0,47 $\eta_{\text{опт}}$ . При виборі насоса на оптимальну подачу середньоексплуатаційний ККД збільшується на 21% і становить 0,56 $\eta_{\text{опт}}$ , при частотному регулюванні – збільшується на 31% і становить 0,61 $\eta_{\text{опт}}$ , при ступеневому регулюванні насосної установки – збільшується на 71% і становить 0,80 $\eta_{\text{опт}}$ . Це дозволяє обґрунтовано проводити вибір типу насоса для підприємств водопостачання ЖКХ та способу його регулювання.

б. Отримані результати дозволяють у подальшому проводити вибір насосного агрегату та способу його регулювання залежно від ступеня нерівномірності водоспоживання для забезпечення мінімального енергоспоживання в різних за продуктивністю системах подачі та розподілу води.

Результати наукових досліджень впроваджені на ряді комунальних підприємств ЖКГ України з сукупним річним економічним ефектом 78 тис. грн. та в навчальний процес Сумського державного університету.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гусак О.Г. Техніко-економічні вимоги до насосних станцій водопровідних мереж житлово-комунального господарства / О.Г. Гусак, М.І. Сотник, М.М. Іванов, С.Ю. Смертяк, С.О. Хованський, В.С. Бойко // Вестник НТУУ "КПІ". Машиностроение. – К.: НТУУ "КПІ", 2007. – С. 247 – 251. *Здобувач брав участь у формулюванні вимог та аналізі результатів.*

2. Сотник М.І. Аналіз способів регулювання роботи насосних станцій комунального водопостачання / М.І. Сотник, С.О. Хованський, О.І. Дужак // Вісник Сумського державного університету. – 2008. – №2. – С. 152–156. *Здобувачем виконаний огляд і аналіз існуючих способів регулювання насосних установок.*

3. Євтушенко А.О. Визначення оптимального складу насосної станції системи комунального водопостачання / А.О. Євтушенко, В.Г. Неня, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2008. – № 4/(51). – Частина 1. – С. 158 – 162. *Здобувач розробив математичну модель роботи групи НА, брав участь в аналізі результатів та формулюванні висновків.*

4. Бойко В.С. Підвищення енергетичної ефективності водопостачання локального об'єкту / В.С. Бойко, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Промислова гідравліка і пневматика. – 2008. – № 1 (19). – С. 100 – 102. *Здобувачем виконано огляд існуючих напрямків підвищення ефективності експлуатації ВЦН.*

5. Бойко В.С. Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження / В.С. Бойко, В.Г. Неня, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2009. – № 4/(57). – Частина 1. – С. 168 – 171. *Здобувач розробив математичну моделі роботи НА при частотному регулюванні, брав участь у аналізі результатів та формулюванні висновків.*

6. Бойко В.С. Узагальнена оцінка економічності системи водопостачання / В.С. Бойко, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – 2009. – Частина 3. – С. 46 – 51. *Здобувач формулював критерії узагальненої оцінки економічності СПРВ, брав участь у дослідженнях та аналізі результатів.*

7. Хованський С.О. Робота динамічних насосів в умовах існування змінного

в часі опору зовнішньої мережі / С.О. Хованський // Промислова гідравліка і пневматика. – 2009. – №3 (25). – С. 56 – 59.

8. Бойко В.С. Підвищення енергоефективності водопостачання збагачувальної фабрики гірничо-збагачувального комбінату / В.С. Бойко, М.М. Юрченко, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – № 4/(63). – Частина 3. – С. 94 – 97. *Здобувач розробив об'єктно-орієнтовану модель досліджуваного об'єкта, брав участь у дослідженнях та формулюванні висновків.*

9. Хованський С.О. Підбір насоса при його роботі на мережу зі змінним опором у часі / С.О. Хованський, В.Г. Неня // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 3/9(45). – С. 47 – 49. *(Здобувач розробив математичну модель НА, при роботі на мережу зі змінним опором у часі.)*

10. Бойко В.С. Вплив використання резервуарів чистої води на енергоефективність водопостачання міста / В.С. Бойко, М.І. Сотник, С.О. Хованський // Вісник Сумського державного університету. – 2010. – №1. – С. 149 – 154. *Здобувач розробив об'єктно-орієнтовану модель досліджуваного об'єкта, брав участь у дослідженнях та формулюванні висновків.*

11. Хованський С.О. Вимоги до форми енергетичних характеристик відцентрових насосів гідравлічних мереж комунального водопостачання / С.О. Хованський // Промислова гідравліка і пневматика. – 2010. – № 1 (27). – С. 56 – 60.

12. Хованський С.О. Системний аналіз комплексу подачі і розподілу води в житлово-комунальному господарстві / С.О. Хованський, В.Г. Неня // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 4/4(46). – С. 56 – 59. *Здобувач брав участь у проведенні системного аналізу СПРВ, в аналізі результатів та формулюванні висновків.*

13. Неня В.Г. Оцінка втрат енергії, пов'язаних зі нестаціонарною роботою відцентрового насоса / В.Г. Неня, С.О. Хованський // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2010. – № 44. – С. 25 – 29. *Здобувач брав участь у розробленні математичної моделі нестаціонарної роботи ВЦН, дослідженнях та формулюванні висновків.*

14. Хованський С.О. Методика вибору насосного агрегату в залежності від ступеня нерівномірності водоспоживання / С.О. Хованський // Вісник НТУ “ХПІ”. – 2010. – № 54. – С. 133 – 138.

## АНОТАЦІЯ

**Хованський С.О.** Підвищення ефективності експлуатації відцентрових насосів у системі водопостачання житлово-комунального господарства. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.17 – гідравлічні машини та гідропневмоагрегати. – Сумський державний університет, Суми, 2010.

Дисертація присвячена теоретичним та експериментальним дослідженням, спрямованим на підвищення енергоефективності експлуатації відцентрових насосів, що працюють на гідравлічну мережу зі змінним опором у часі (на прикладі систем подачі та розподілу води житлово-комунального господарства). Шляхом системного аналізу встановлені узагальнений показник економічності роботи та об'єкт регулювання системи водопостачання з відцентровими насосами у її складі. Запро-

поновано вдосконалені математичні моделі роботи відцентрових насосів, що дозволяють визначати їх номінальні параметри за критерієм мінімуму енергоспоживання, вибирати оптимальну кількість насосів при ступеневому регулюванні, визначати раціональні умови експлуатації насосів із застосуванням привода з частотним регулюванням. Встановлені вимоги до форми та параметрів характеристик насосів залежно від обраного способу регулювання. Розроблено методику підбору насосів при різних значеннях ступеня нерівномірності подачі насоса. Результати роботи впроваджено у ряді комунальних підприємств України і використовуються у навчальному процесі.

Ключові слова: робочий процес, відцентровий насос, експлуатація гідромашин, енергетичні характеристики насоса, способи регулювання.

## АНОТАЦІЯ

**Хованский С.А.** Повышение эффективности эксплуатации центробежных насосов в системе водоснабжения жилищно-коммунального хозяйства. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.17 – гидравлические машины и гидропневмоагрегаты. – Сумский государственный университет, Сумы, 2010.

Диссертация посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям, направленным на повышение энергоэффективности эксплуатации центробежных насосов, работающих на гидравлическую сеть с переменным сопротивлением во времени (на примере системы подачи и распределения воды жилищно-коммунального хозяйства). Экспериментальным путем установлено, что потребление в системах подачи и распределения воды ЖКГ имеет сложный характер изменения во времени с периодом  $t_{cp} = 20$  с и средней амплитудой  $2 \text{ м}^3/\text{ч}$ . При этом среднеэксплуатационный КПД насоса составляет около 50 % от оптимального, как следствие – высокая экономичность насосов практически нивелируется низкой эффективностью их работы в гидравлических сетях с переменным во времени сопротивлением.

Предложено применение упорядоченной диаграммы подачи центробежных насосов, которая учитывает переменные во времени гидромеханические параметры гидравлической сети в течение определенного отрезка времени и позволяет определять энергетическую эффективность их работы.

Исследовано влияние нестационарных явлений в сети на характер рабочего процесса центробежного насоса, что позволило установить наличие дополнительных потерь энергии как в самом насосе, так и в трубопроводах. Выполненная оценка составляющих баланса энергии насоса на неустановившихся режимах работы показывает, что дополнительные потери энергии составляют около 6% на номинальном режиме.

Путем системного анализа установлены обобщенный показатель экономичности работы и объект регулирования системы водоснабжения с центробежными насосами. Предложены усовершенствованные математические модели работы центробежных насосов, что позволяют определять их номинальные параметры за критерием минимума энергопотребления, выбирать оптимальный состав насосной установки при ступенчатом регулировании, определять целесообразные условия эксплуатации насосов с применением привода с частотным регулированием. Установлены требования к форме и параметрам характеристик насосов в зависимости от

избранного способа регулирования.

Разработана методика выбора насосного агрегата и способа его регулирования в зависимости от степени неравномерности подачи, определены диапазоны рационального применения разных видов регулирования. Установлено, что для насосных станций третьего подъема (степень неравномерности  $b = 3$ ) при выборе насоса на оптимальную подачу среднеексплуатационный ККД увеличивается на 21%, при частотном регулировании – увеличивается на 31%, при ступенчатом регулировании насосной установки – увеличивается на 71%.

Результаты работы внедрены на ряде коммунальных предприятий Украины и используются в учебном процессе.

Ключевые слова: рабочий процесс, центробежный насос, эксплуатация гидромашин, энергетические характеристики насоса, способы регулирования.

## SUMMARY

**Khovansky S.O.** Effectiveness increase of centrifugal pumps maintenance in water-supply system of housing and communal services. – Manuscript.

The dissertation for receiving the scientific degree of candidate of technical sciences in speciality 05.05.17 – hydraulic machines and hydropneumatic units. – Sumy State University, Sumy, 2010.

The dissertation focuses on theoretical and experimental research aimed at improving energy efficiency of exploitation of centrifugal pumps, that work on the hydraulic network with variable resistance in time (for example, water-supply and water distribution systems of housing). By systematic analysis the indicator of economy of work and the object of water-supply system regulation are generalized with centrifugal pumps in its composition. The advanced mathematical models of centrifugal pumps' work are offered, which allow to determine their nominal parameters after the criterion of energy consumption minimum, to choose the optimal number of pumps during cascade control, to determine rational conditions for exploitation of pumps with application of occasion with the frequency adjusting. Requirements to the form and parameters of pumps' descriptions depending on the selected adjusting method are set. The method of pumps' selection at different values of degree of pump's serve unevenness is developed. The results of work are inculcated in a number of communal enterprises in Ukraine and used in educational process.

Keywords: working process, centrifugal pump, hydraulic machines' exploitation, power descriptions of pump, adjusting methods.

Підписано до друку 14.02.2011 р. Формат 60×90/16. Ум. друк. арк. 1,1.  
Обл.- вид. 0,9. Тираж 100 пр. Замовлення №

Видавець і виготовлювач Сумський державний університет,  
вул. Римського-Корсакова, 2., м.Суми, 40007  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3062 від 17.12.2007.