

УДК 621.65

С.О. ХОВАНСЬКИЙ, кандидат технічних наук

Ю.С. ПОТАПОВА, студентка

Сумський державний університет

МЕТОДИКА ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ НАСОСА, ПРАЦЮЮЧОГО НА ГІДРАВЛІЧНУ МЕРЕЖУ ЗІ ЗМІННИМ У ЧАСІ ОПОРОМ

Розроблена методика визначення раціональних параметрів насоса, який працює на гідравлічну мережу зі змінним опором у часі, за критерієм мінімального енергоспоживання та визначений вплив зовнішніх чинників на функціонування системи.

Ключові слова: енергозбереження, водопостачання, насосне обладнання.

Разработана методика определения рациональных параметров насоса, который работает на гидравлическую сеть с переменным во времени сопротивлением, согласно критерию минимального энергопотребления и определено влияние внешних факторов на функционирование системы.

Ключевые слова: энергосбережение, водоснабжение, насосное оборудование.

The method for determining the rational parameters of the pump, which works on the hydraulic network with time-varying resistance according to the criterion of power consumption's minimum is developed and the influence of external factors on the system's functioning is determined.

Key words: energysaving, water supply, pumping equipment.

Вступ

Відповідно Закону України “Про енергозбереження” на сучасному етапі розвитку народного господарства нашої країни велика увага приділяється використанню енергозберігаючих технологій, що особливо актуально для житлово-комунального господарства (ЖКГ), яке за обсягами споживання енергоносіїв посідає третє місце в Україні після енергетики та металургії. Системи водопостачання належать до найбільш енергоємних об’єктів ЖКГ, де основними споживачами електроенергії є насосні установки. Частка

енергії, споживаної приводами насосів, за різними джерелами оцінюється від 18 до 22 % від усієї використовуваної в промисловості країни електроенергії.

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 [1]. Таким чином, високий показник економічності насосів (паспортний ККД 75...85%) практично нівелюється низькою ефективністю їх роботи на гідравлічну мережу зі змінним у часі опором.

Аналіз попередніх досліджень

Традиційно склалося, що в ЖКГ проектування систем водопостачання і вибір обладнання виконувалося на 20-річну перспективу розвитку, виходячи з рівномірного графіку подачі води, що виправдано тільки наявністю значних за обсягом регулюючих ємностей у мережі. Насосне обладнання (з розрахунком на зростання водоспоживання в майбутньому) вибиралося зі стандартного ряду з запасом по напору і розраховувалося на максимальний режим споживання води. Але у системах комунального водопостачання мають місце добові, тижневі та сезонні коливання водоспоживання, внаслідок чого реальні робочі режими насосних агрегатів знаходяться поза робочими зонами їх характеристик.

Незважаючи на те, що сам факт нерівномірності водопостачання констатується в дослідженнях різних авторів, вибір насосного обладнання ґрунтується переважно на основі максимальних режимів подачі води. Такий підхід до вибору параметрів насосного обладнання створює високий рівень енерговитрат, які обумовлені встановленням обладнання завищених параметрів.

Створення економічної системи водопостачання базується на розв'язку оптимізаційної задачі, основною цільовою функцією якої є зменшення витрат електроенергії на перекачування споживачу необхідних обсягів води.

Мета та задачі роботи

Метою даної роботи є енергозбереження при експлуатації насосного обладнання, працюючого в діючих технологічних мережах. При цьому вирішується задача по розробці методики визначення оптимальних параметрів насоса, що працює на мережу зі змінним опором в часі, за критерієм мінімального енергоспоживання та визначення впливу зовнішніх чинників на функціонування системи.

Матеріали та результати дослідження

Високий рівень енергоємності продукції і послуг вітчизняних водопостачальних підприємств обумовлений нераціональним використанням енергії у виробничих процесах внаслідок значного зношення діючого обладнання, високого рівня втрат води в мережах, а також наперед високою енергоємністю продукції і послуг, закладеною при проектуванні цих підприємств. Останній фактор значною мірою визначений історично початковими умовами розвитку систем водопостачання і водовідведення в містах України. Становлення цієї сфери комунального господарства відбувалося в період панування планової економіки (1960-1980-і роки), яка характеризувалася найбільшими обсягами державних капітальних вкладень у міськводоканали. У той час розвиток економіки відбувався переважно екстенсивним шляхом в умовах низьких цін на енергоресурси.

Ефективність роботи насосного обладнання суттєво залежить від режимів водоспоживання. Як правило, режими водоспоживання визначаються багатьма, незалежними один від одного, факторами: кліматичними, погодними, культурно-соціальними умовами, режимами роботи підприємств тощо. Режими водоспоживання характеризуються, зазвичай, добовими, місячними, річними графіками водоспоживання. Але при дослідженні режимів роботи насосних установок за тривалий проміжок часу добовими графіками водоспоживання користуватися не зручно, оскільки вони суттєво відрізняються один від одного за днями тижня, порами року тощо. Їх практично неможливо описати математичними залежностями. З цих причин для аналізу режимів роботи насосних установок пропонується використовувати впорядковані діаграми водопостачання по аналогії з впорядкованими діаграмами електричних навантажень [2]. Під впорядкованою діаграмою водопостачання розуміється крива, що сполучає розташовані у порядку зростання ординати добових графіків водопостачання за тривалий проміжок часу, наприклад рік, місяць, добу.

Для обґрунтування можливості застосування впорядкованих діаграм водоспоживання автори використовували наступні міркування. Як зазначалося вище, формування режимів водоспоживання залежить від низки випадкових факторів, які є незалежними один від одного, тому величина обсягів споживання води у часі для окремого споживача є величиною випадковою. Оскільки споживання води для групи споживачів є сумою незалежних випадкових водоспоживань окремих споживачів, то за великої їх кількості сумарне значення водоспоживання підкоряється нормальному закону розподілу випадкових величин. Даний факт теоретично впливає з теореми Ляпунова [3], та підтверджений чисельними дослідженнями водоспоживання на діючих підприємствах різних галузей промисловості і комунального господарства [2] (причому, нормальний закон розподілу можна застосовується, починаючи з 7-8 споживачів, що входять до групи). Враховуючи зазначене вище, впорядкована діаграма водоспоживання

базується на використанні елементів теорії ймовірності розподілу випадкових величин та показує скільки часу група споживачів працює з певним значенням витрати впродовж розглядуваного проміжку часу (доба, місяць, рік). В роботі [4] впорядковану діаграму водоспоживання запропоновано апроксимувати експоненціальною функцією типу $Q(t) = ae^{bt}$, де a і b – коефіцієнти апроксимації, що характеризують графік добового водоспоживання (див. рис. 1). Коефіцієнт b характеризує ступінь нерівномірності водоспоживання, якщо $b = 0$, то графік водоспоживання є сталим у часі.

Для розробки методики вибору параметрів насосу, працюючого на гідравлічну мережу зі змінним у часі опором, пропонується використовувати впорядковані діаграми подачі насоса в безрозмірних координатах. Побудова таких діаграм базується на наступних позиціях (див рис. 1): площа під впорядкованою діаграмою дорівнює 1, а числові значення на осі абсцис змінюється в проміжках $[0,1]$.

Значення по осі абсцис для впорядкованої діаграми в безрозмірних координатах визначається як

$$t^* = \frac{t}{t_e - t_i},$$

де t^* – поточне значення моменту часу впорядкованої діаграми; t – поточне значення моменту часу на графіку водоспоживання; t_n , t_k – початкове (кінцеве) значення моменту часу на графіку водоспоживання;

Значення по осі ординат для впорядкованої діаграми в безрозмірних координатах визначається як

$$Q^* = \frac{Q}{\int_{t_i}^{t_e} Q(t) dt} = \frac{Q \cdot (t_e - t_i)}{\int_{t_i}^{t_e} Q(t) dt},$$

де Q^* – поточне значення відносного водоспоживання впорядкованої діаграми; Q – поточне значення водоспоживання.

У роботі [4] показано, що впорядковану діаграму подачі насоса можна апроксимувати експоненціальною функцією типу $Q(t) = ae^{bt}$. При цьому загальний обсяг спожитої води $V(\text{м}^3)$ визначається як

$$V = \int_{t_i}^{t_e} Q(t) dt = \int_{t_i}^{t_e} a \cdot e^{b \cdot t} dt. \quad (1)$$

Інтегруючи вираз (1), маємо

$$V = \frac{a \cdot e^{b \cdot t_e}}{b} - \frac{a \cdot e^{b \cdot t_i}}{b}.$$

Звідси знаходимо a :

$$a = \frac{V \cdot b}{e^{b \cdot t_e} - e^{b \cdot t_i}}. \quad (2)$$

Враховуючи початкові припущення, що $V = 1$, $t_n = 0$, $t_k = 1$, та (2) маємо

$$a = \frac{b}{e^b - 1}.$$

Отже, залежність зміни водоспоживання від часу на впорядкованій діаграмі визначається як

$$Q(t) = a \cdot e^{b \cdot t} = \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{b \cdot t}. \quad (3)$$

Так, на рис. 1 а), б) представлені приклади добових графіків водоспоживання населеного пункту з чисельністю мешканців більше 100 тис. чол. та мікрорайону з числом мешканців біля 5 тис. чол. відповідно, визначені за СНиП 2.04.02–84 [5]. На рис. 1 в), г), відповідно, представлені їх впорядковані діаграми та визначені залежності $Q = f(t)$, за методикою викладеною вище.

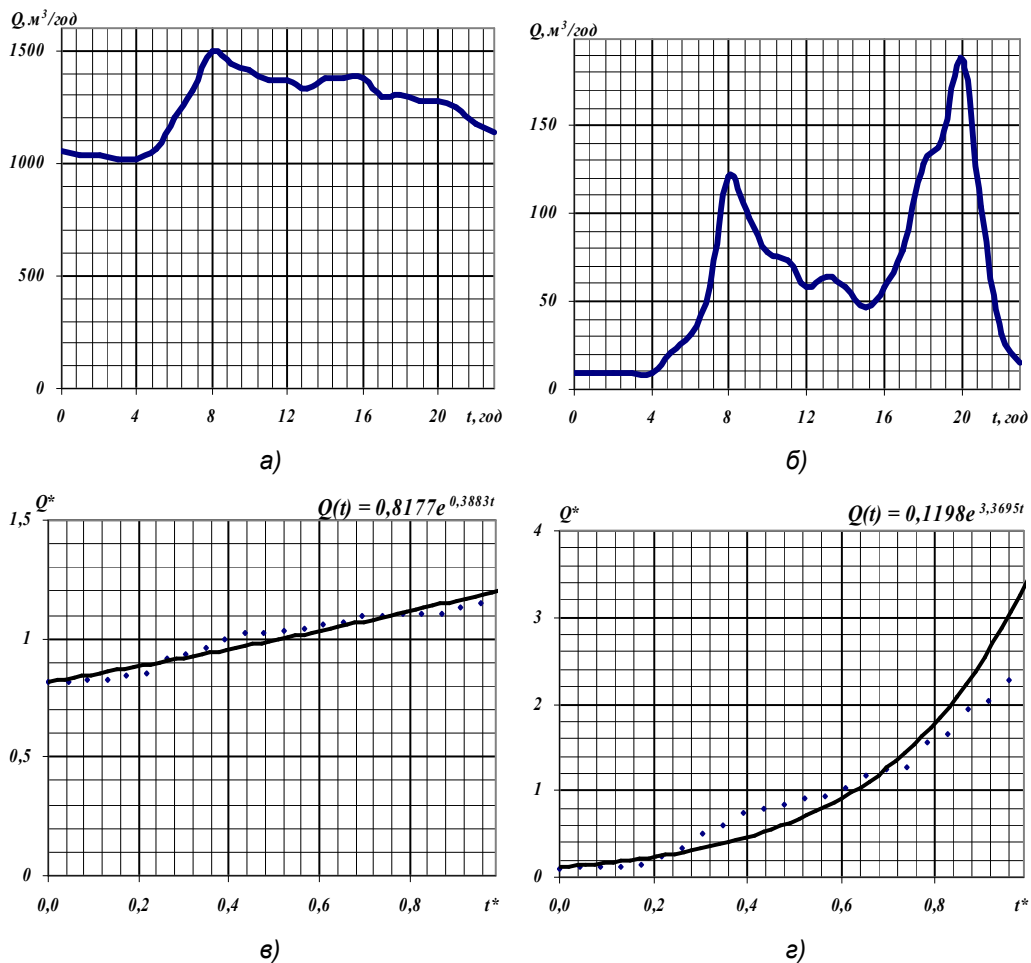


Рис.1. Добова нерівномірність водоспоживання:

- а – населений пункт з чисельністю мешканців більше 100 тис. чол.;
- б – мікрорайон з числом мешканців біля 5 тис. чол.;
- в, г – їх впорядковані діаграми, відповідно

Вибір оптимальних параметрів насоса, що працює на мережу зі змінним опором в часі, необхідно здійснювати за критерієм мінімального енергоспоживання насоса. Значення споживаної електроенергії впродовж доби визначається за формулою

$$N(t) = \int_0^t \frac{\rho g Q(t) H(Q)}{\eta(Q)} dt. \quad (4)$$

У виразі (4) значення витрати $Q(t)$ визначається з впорядкованої діаграми водоспоживання за залежністю (3). Напірна характеристика насоса $H(Q)$, яку можна описати кривою другого порядку (див. рис. 2), визначалася через номінальні параметри насоса H_m , Q_m і тангенс кута дотичної в цій точці, згідно роботи [6], як

$$H(Q) = \left(H_m - \frac{tg\gamma}{2} \cdot Q_m \right) + \frac{tg\gamma}{2 \cdot Q_m} \cdot Q^2. \quad (5)$$

Аналогічно залежність ККД насоса від витрати, яку теж можна описати кривою другого порядку (див. рис. 2), визначалася через оптимальні параметри (η_{opt} і Q_{opt}), згідно роботи [6], як

$$\eta(Q) = \frac{\eta_{opt} \cdot Q \cdot (2 \cdot Q_{opt} - Q)}{Q_{opt}^2}. \quad (6)$$

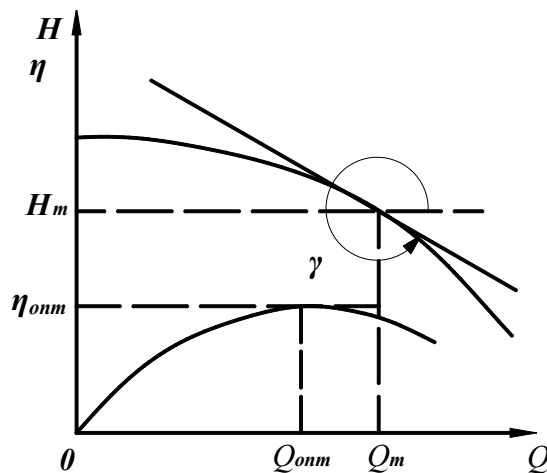


Рис.2. Параметри енергетичних характеристик насоса

Підставивши залежності (5), (6) та залежність витрати від часу (3) у вираз (4), було отримано вираз (7) для спожитої електричної енергії впродовж розглядуваного проміжку часу t :

$$N(t) = \frac{\rho g}{\eta_m} \int_0^{t_1} \frac{\left(H_m - \frac{tg\gamma}{2} Q_m + \frac{tg\gamma}{2 Q_m} a^2 e^{2bt} \right) Q_0^2}{2Q_0 - a e^{bt}} dt. \quad (7)$$

Для порівняння енергоспоживання при довільних параметрах насоса N і енергоспоживання при виборі насоса на максимальне значення водоспоживання було визначено відносне енергоспоживання N^* :

$$N^* = \frac{\int_0^{t_1} \frac{\left(H_m - \frac{tg\gamma}{2} a e^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} a e^{b(2t-t_1)} \right) k^2 a e^{2bt_1}}{2k e^{bt_1} - e^{bt}} dt}{\int_0^{t_1} \frac{\left(H_m - \frac{tg\gamma}{2} a e^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} a e^{b(2t-t_1)} \right) a e^{2bt_1}}{2e^{bt_1} - e^{bt}} dt}. \quad (8)$$

При цьому оптимальна подача насоса визначалася як $Q_{\text{опт}} = kQ_m$, де k – відносна до максимального водопостачання подача.

Для розробки універсальної методики визначення оптимальних параметрів насосної установки аналогічно з представленням впорядкованої діаграми водоспоживання у безрозмірному вигляді також скористаємося представленням енергетичної характеристики насоса у безрозмірних координатах. Для оцінювання форм характеристик різних насосів у роботі [7] пропонується перебудувати енергетичні характеристики насоса $H = f(Q)$, $N = f(Q)$, $\eta = f(Q)$ у відносних координатах, прийнявши $H_{\text{опт}}$, $Q_{\text{опт}}$, $N_{\text{опт}}$, $\eta_{\text{опт}}$ за одиницю. Тоді залежності напору (5) і ККД (6) від подачі насоса в безрозмірному вигляді запишуться так

$$\overline{H(Q)} = \left(1 - \frac{\text{tg}\gamma}{2} \cdot \overline{Q_m}\right) + \frac{\text{tg}\gamma}{2 \cdot \overline{Q_m}} \cdot \overline{Q}^2, \quad (9)$$

$$\overline{\eta} = \frac{\overline{Q} \cdot (2 \cdot \overline{Q_{\text{ндо}}} - \overline{Q})}{\overline{Q_{\text{ндо}}}^2}. \quad (10)$$

Враховуючи безрозмірну форму представлення енергетичних характеристик насоса (9) (10) та залежності (3) для впорядкованої діаграми водоспоживання, вираз (8) можна подати у вигляді

$$N^* = \frac{\int_0^1 \frac{\left(1 - \frac{\text{tg}\gamma}{2} \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^b + \frac{\text{tg}\gamma}{2} \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{b(2t-1)}\right) \cdot k^2 \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{2b}}{2ke^b - e^{bt}} dt}{\int_0^1 \frac{\left(1 - \frac{\text{tg}\gamma}{2} \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^b + \frac{\text{tg}\gamma}{2} \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{b(2t-1)}\right) \cdot \frac{b}{e^b - 1} \cdot e^{2b}}{2e^b - e^{bt}} dt}. \quad (11)$$

Аналітичний розв'язок виразу (11) є досить складним, тому його чисельний розв'язок здійснений у математичному обчислюваному комплексі MathCad, а результати наведені на рис. 3.

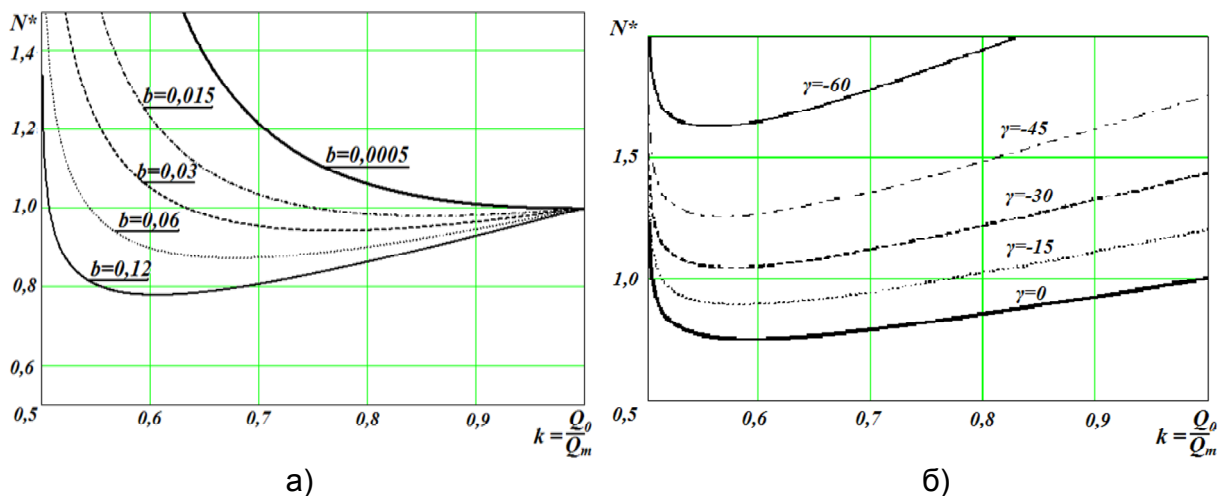


Рис.3. Залежності зміни відносного енергоспоживання:
 а – від ступеня нерівномірності водоспоживання b ; б – від тангенсу кута нахилу напірної характеристики насоса γ

Аналіз рис. 3 а) показує, що різним значення ступеня нерівномірності водоспоживання відповідають різні значення оптимальної подачі Q_0 при забезпеченні мінімального енергоспоживання. Аналіз рис. 3 б) показує, що зі збільшенням крутизни напірної характеристики насоса збільшується питоме енергоспоживання. Тому для забезпечення мінімального енергоспоживання необхідно обрати насоси з меншою крутизною напірної характеристики.

Відповідно до наведених вище міркувань розроблено методику вибору насосного агрегату залежно від ступеня нерівномірності водоспоживання. Схематично алгоритм підбору насоса відповідно до ступеня нерівномірності добового графіка водопостачання представлений на рис. 4. Основною відмінністю запропонованої методики від існуючих є врахування нерівномірності водоспоживання у часі.

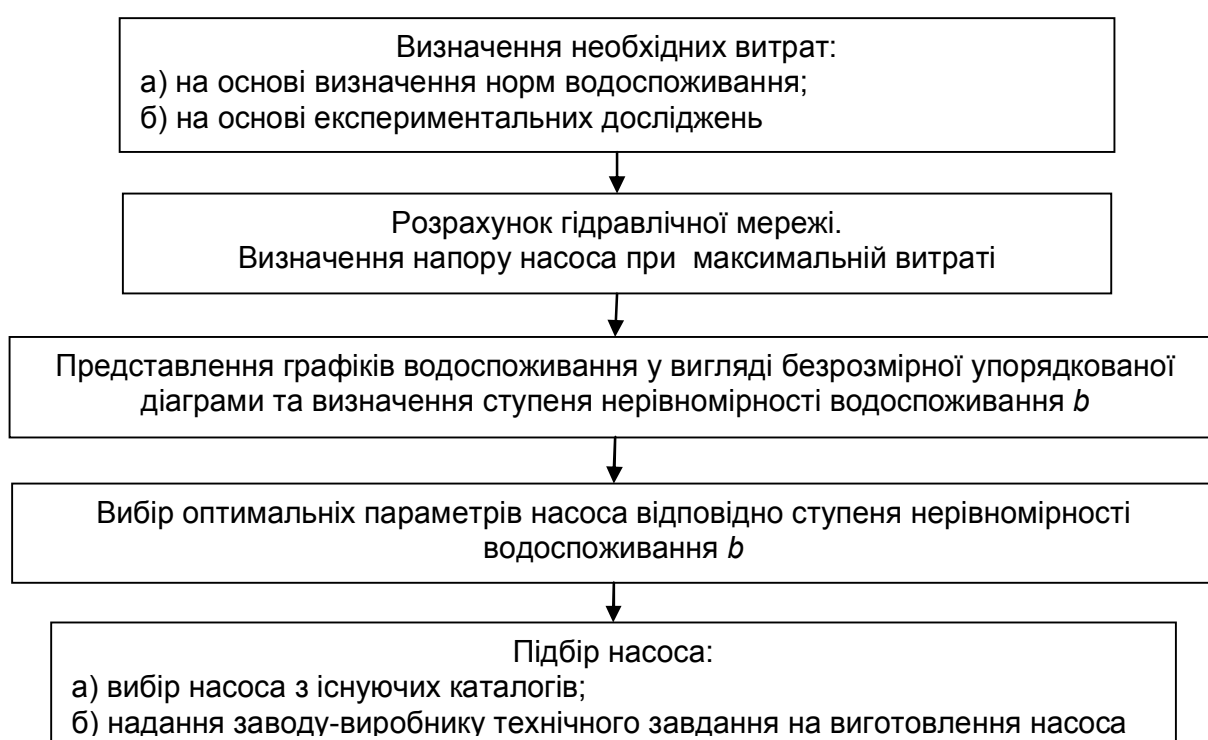


Рис.4. Алгоритм вибору насоса залежно від ступеня нерівномірності водоспоживання

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, а саме забезпечення максимально пологої форми напірної характеристики.

Висновки

1. Обґрунтовано використання впорядкованих діаграм водоспоживання, застосування яких дозволяє розробляти математичні

моделі робочого процесу для проведення узагальненого аналізу режимів роботи насосів при їх експлуатації.

2. Розроблено методику для визначення параметрів насоса, що працює на мережу зі змінним опором у часі, що передбачає мінімальне споживання потужності на приведення у рух насоса.

3. Під час проведення досліджень встановлено, що при роботі насоса на мережу зі змінним опором в часі є гранично допустимий рівень енергоспоживання та визначено вплив різних чинників на нього.

4. Встановлено, що різним значенням ступеня нерівномірності водоспоживання відповідають різні значення номінальної подачі Q_0 при забезпеченні мінімального енергоспоживання.

5. Визначено, що найменший рівень енергоспоживання можна отримати за умови мінімально можливої крутизни напірної характеристики насоса.

Список літератури

1. *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. Executive Summary.* / Hydraulic Institute and Europump. – Oxford: Published by Elsevier Ltd., – January 2001. – 126 p.

2. *Волобринский С.Д.* Электрические нагрузки и балансы промышленных предприятий / Волобринский С.Д. – Л.: «Энергия», 1976. – 128 с.

3. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей: учебник / Вентцель Е.С. – [7-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Высшая школа, 2001. – 575 с.

4. *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.

5. *Водоснабжение.* Наружные сети и сооружения: СНиП 2.04.02–84. – [Действительный от 1985–01–01]. – М.: Госстандарт СССР, 1985 – 204 с.

6. *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.

7. *Степанов А.И.* Центробежные и осевые насосы. Теория, конструирование и применение / Степанов А.И. – [пер. с англ. инж. М.Я. Лейферова и к. т. н. М.В. Поликовского, под ред. д. т. н. проф. В.И. Поликовского]. – М.: Гос. НТИ Машиностроительной л-ры, 1960. – 465 с.