

**Підбір насоса при його роботі на  
мережу зі змінним у часі  
гідравлічним опором**

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	3
1. Сучасний стан системи водопостачання .....	6
2. Існуючі методики вибору номінальних параметрів насоса для систем водопостачання житлово-комунальному господарстві .....	8
3. Особливості експлуатації насосних агрегатів у складі гідравлічної мережі зі змінним опором у часі .....	12
4. Впорядкована діаграма подачі насоса .....	15
5. Визначення номінальних параметрів одного насоса, який працює на мережу зі змінним у часі гідравлічним опором .....	19
ВИСНОВКИ.....	27
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	28

## ВСТУП

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 завідомо 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 [1]. В період планового розвитку економіки країни функціонування підприємств водопостачання характеризувалося соціальною направленістю, у зв'язку з чим платежі споживачів не покривали фактичних витрат, фінансування ж здійснювалося за залишковим принципом.

При проектуванні насосних станцій (з розрахунком на ріст водоспоживання в майбутньому) насоси вибиралися зі стандартного ряду з запасом по напору і розраховувалися на максимальний режим витрати, однак при цьому не враховувалися коливання добового графіка споживання води.

Враховуючи вищезазначене, актуальною проблемою для підприємств водопостачання є високий рівень енерговитрат, які обумовлені встановленням обладнання завищеної потужності. Таким чином практично у всіх містах України є резерви зниження енергоємності водопостачання за рахунок визначення оптимальних параметрів насосного обладнання насосної станції системи водопостачання на підставі аналізу коливань добового графіка споживання води.

## **Аналіз попередніх досліджень та актуальність роботи.**

Традиційно склалося, що в житлово-комунальному господарстві проектування систем водопостачання і вибір обладнання виконувалося на 20-річну перспективу розвитку, виходячи з рівномірного графіку подачі води, що виправдано тільки наявністю дуже великих регулюючих ємностей у мережі. Насосне обладнання (з розрахунком на ріст 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 та при виборі насосного обладнання, розрахунки проводяться виключно на максимальний режим споживання. Такий підхід до вибору параметрів насосного обладнання створює високий рівень енерговитрат, які обумовлені встановленням обладнання завищеної потужності.

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

**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 функціонування системи.

**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: 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.

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

– обґрунтовано застосування впорядкованої діаграми подачі відцентрових насосів, яка враховує змінні у часі гідромеханічні параметри гідравлічної мережі протягом певного відрізка часу;

– 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.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні методики вибору відцентрових насосів при різних значеннях ступеня нерівномірності їх подачі у часі.

**Особистий внесок автора.** Автором запропоновано застосування впорядкованих діаграм подачі насоса, розроблена методика визначення оптимальних параметрів насоса, що працює на мережу зі змінним у часі опором, за критерієм мінімального енергоспоживання.

Робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку джерел з 12 найменувань, 29 сторінок машинописного тексту, 10 малюнків.

## 1. Сучасний стан системи водопостачання

Житлово-комунальне господарство за обсягами споживання енергоносіїв посідає третє місце в Україні після енергетики та металургії [1]. Основною складовою витрат у системі водопостачання є електроспоживання, частка енерговитрат у тарифах на зазначенні послуги складає більше 50 % [2], тому питання ефективності використання насосного обладнання є першочерговим.

Іншою складовою витрат є втрати питної води, при транспортуванні та споживанні, природні запаси якої обмежені. Сьогодні надлишок тиску (напору) води на більшості насосних станцій та гідравлічних мереж на 20...30 % [1] перевищує об'єктивно необхідний рівень, в результаті чого витоки води становлять до 40 % добової подачі, виникає різке зниження тиску в години "пік" і значне підвищення тиску в мережах у нічний час, що призводить до виникнення аварійних ситуацій.

Третьою складовою витрат у системах комунального водопостачання є висока вартість технологічного устаткування, його експлуатації та обслуговування (як насосного агрегату, так і трубопровідних систем), термін служби якого залежить і від частоти виникнення перевантажень. Слід також відмітити, що тарифи на електроенергію в усьому світі, у тому числі і в Україні, ростуть швидше, ніж ціни на устаткування, що є передумовою для впровадження енергозберігаючого обладнання, та дозволяє створити більш досконалу технологію водопостачання із плавним регулюванням робочих параметрів насосних агрегатів і використанням широких можливостей підвищення економічної ефективності функціонування систем водопостачання.

Питомі витрати електроенергії на виробництво води суттєво різняться по окремим регіонам. Відповідно до представлених у [3] даних у 2008 р. найбільші питомі витрати електроенергії на перекачування 1000 м<sup>3</sup> води були у Чернівецькій, Луганській, Хмельницькій та Донецькій областях: 1916,

1711,1669 та 1606 кВт/1000 м<sup>3</sup> води відповідно; найнижчі – у Київській 290 кВт/1000 м<sup>3</sup>. Значення показника питомих витрат електроенергії для інших регіонів знаходилося у діапазоні від 650 до 1500 кВт/1000 м<sup>3</sup> (для Сумської області – 1210 кВт/1000 м<sup>3</sup>).

Згідно даних КП “Міськводоканал” (м. Суми) у 2010 році питомі витрати електричної енергії на постачання 1 м<sup>3</sup> води споживачам, що проживають в будинках поверховістю менше 5 поверхів складають 1,236 кВт·год/м<sup>3</sup> (структура питомих витрат електроенергії представлена на рис.1а), а для споживачів, що мешкають в будинках поверховістю більше 5 поверхів, складають 2,264 кВт·год/м<sup>3</sup> (структура питомих витрат електроенергії представлена на рис. 1б).

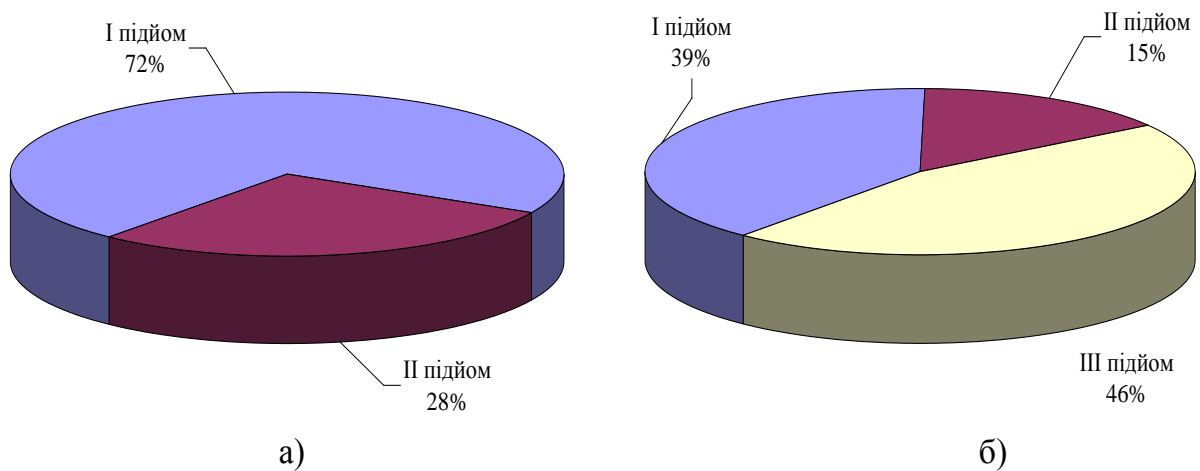


Рис. 1.– Питомі витрати електричної енергії на перекачування 1 м<sup>3</sup> води в м. Суми: а) для будинків поверховістю до 5 поверхів, б) для будинків поверховістю понад 5 поверхів

## **2. Існуючі методики вибору номінальних параметрів насоса для систем водопостачання житлово-комунальному господарстві**

Водоспоживання виступає у якості одної з основних характеристик рівня народного добробуту. На даний час без глибокого дослідження процесів водоспоживання неможливо не тільки задати напрямок для проектування систем водозабезпечення, визначити оптимальні темпи і напрямки розвитку, але й забезпечити безперебійне водопостачання, при раціональному використанні води.

Обсяги водоспоживання в житлово-комунальному господарстві нерівномірні і залежать від багатьох факторів: поверховості забудови, ступеня благоустрою будинків, стану встановленого водорозбірного обладнання, числа споживачів, кліматичних умов, пори року [2]. Режими водоспоживання, тобто зміни величин витрати води впродовж доби, місяця, року також нерівномірні і залежать від багатьох факторів. Величина і режими водоспоживання впливають на роботу водопровідних мереж, на якість і безперебійність водозабезпечення населення. Якісне водопостачання забезпечується у тому випадку, коли процеси подачі і споживання води динамічно збалансовані.

У більшості випадків водоспоживання має випадковий характер, це пояснюється тим, що вода в мережі споживається у стохастичному режимі, в кожний інший момент часу кількісний і якісний склад споживачів води відрізняється від початкового [4]. Ця обставина є тим фактором, який ускладнює оцінку роботи насосного обладнання, особливо споживання електричної енергії.

Сучасні методики побудови математичних моделей режимів водоспоживання базуються на основі теорії випадкових функцій, але проблема в застосуванні цих методик полягає у складності отримання статистичних матеріалів, необхідних для застосування цих методик і



побудови моделей, що є причиною відсутності широких наукових досліджень і їх узагальнень для розробки інженерних методик розрахунків [5].

Розрахункове добове значення водоспоживання кладеться в основу розрахунків всієї системи подачі і розподілу води. Для розрахунку системи водопостачання важливе також врахування нерівномірності водоспоживання впродовж доби. Режим господарсько-питного водоспоживання протягом доби, місяця, року в населеному пункті не буває рівномірним і залежить від багатьох факторів (режиму життя і трудової діяльності людини, пори року, місцевих умов тощо).

Режим водоспоживання населенням є в значній мірі випадковим і некерованим процесом. Але при проектуванні і експлуатації систем подачі і розподілу води вони задаються деякими нормованими графіками відбору води впродовж доби, року, тощо. Дані графіки отримані на основі вивчення та аналізу дійсних графіків водоспоживання населених пунктів, що є близькими за кліматичними та демографічними умовами, чисельності населення, по ступеню санітарно-технічного благоустрою помешкань [6].

Розрахункове середнє добове водоспоживання, м<sup>3</sup>/добу, на господарсько-питні потреби в населених пунктах визначаються як

$$Q_{\text{доб.ср.}} = \frac{\sum q_{\text{ж.і}} \cdot N_i}{1000}, \quad (1)$$

де:  $q_{\text{ж.і}}$  – середньодобова норма водоспоживання на одного мешканця, л/доб.чол, приймається відповідно до СНіП 2.04.01-85 [7];

$N_i$  – розрахункова чисельність мешканців, чол.

Зазвичай вважають, що протягом року коливання водоспоживання відображається літнім і зимовим графіком. В розрахунках ці коливання оцінюються коефіцієнтом добової нерівномірності: найбільшим  $K_{\text{max}} = 1,1 - 1,3$ ; найменшим  $K_{\text{min}} = 0,7 - 0,9$  [7].

Протягом доби погодинні витрати також мають значні коливання, які

враховуються найбільшим та найменшим коефіцієнтами годинної нерівномірності відповідно [7]:

$$K_{\max} = \alpha_{\max} \cdot \beta_{\max}, \quad (2)$$

$$K_{\min} = \alpha_{\min} \cdot \beta_{\min}, \quad (3)$$

де  $\alpha_{\max} = 1,2 - 1,4$ ,  $\alpha_{\min} = 0,4 - 0,6$  – коефіцієнти, які враховують ступінь благоустрою будинків, режими роботи підприємств та інші місцеві умови (приймаються відповідно до СНіП 2.04.02-84) [7];

$\beta$  – коефіцієнт, який враховує чисельність мешканців у населеному пункті (приймається відповідно до СНіП 2.04.02-84) [7].

Так на рис. 2 представлений питомий розподіл добових витрат води за годинами доби для населеного пункту з числом мешканців більше 100 тис. чол., та мікрорайону з числом мешканців біля 5 тис. чол. [8].

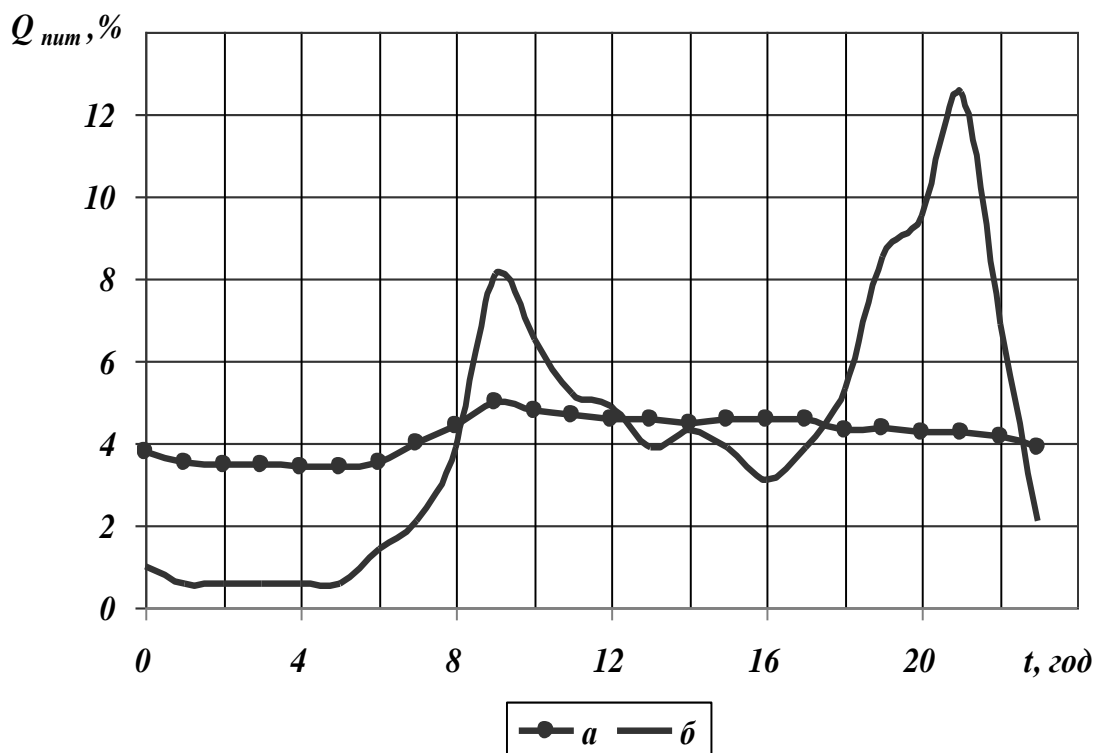


Рис. 2.– Питомий розподіл добових витрат води за годинами доби для а) населеного пункту з числом мешканців більше 100 тис. чол.; б) мікрорайону з числом мешканців біля 5 тис. чол.

Аналіз даних графіків показує, що за більшої кількості мешканців коефіцієнти годинної нерівномірності менші. Це пояснюється тим, що графік водопостачання міста в цілому впродовж доби є сумою індивідуальних графіків водоспоживання окремих споживачів. Зазвичай індивідуальні графіки водоспоживання окремих споживачів значно відрізняються один від одного, а при складанні значної їх кількості загальний графік водоспоживання згладжується. Відхилення від даної закономірності можливе у населених пунктах з однаковим ритмом життя більшої частини населення: курортні міста, робітничі поселення тощо [8].

За існуючими рекомендаціями насоси вибираються зі стандартного ряду з запасом по напору і розраховуються на максимальний режим витрати з використанням коефіцієнтів добової нерівномірності водоспоживання [7]. Ці коефіцієнти по суті являються коефіцієнтами запасу до осередненого водоспоживання і не відображають дійсну зміну режиму водопостачання впродовж доби. До того ж слід відмітити, що коефіцієнти добової нерівномірності були визначені в результаті обробки великого масиву даних по водоспоживанню у 80 роках і затверджені СНіП 2.04.02-84 [7], на сьогодні ж кількісна і якісна структура споживання води населенням змінилася.

### 3. Особливості експлуатації насосних агрегатів у складі гідравлічної мережі зі змінним опором у часі

При експлуатації відцентрових насосів особливу увагу слід приділяти їх робочому діапазону. Зазвичай, мінімально допустима подача при тривалій роботі кожного типу насосів визначається гранично допустимим рівнем вібрації підшипникових опор на цих режимах, і перебуває у межах  $0,70 - 0,75 Q_{onm}$  (за винятком існування додаткових обмежень по кавітації, формі характеристики  $H = f(Q)$  тощо) [9].

Робота насоса в режимах  $0,3 - 0,5 Q_{onm}$ , внаслідок виникнення зворотних течій на вході та виході робочого колеса, супроводжується низкою проблем, пов'язаних з підвищенням вібрації насоса, виникненням нестационарних осьових і радіальних сил, що може призвести до виходу з ладу опорних та ущільнюючих вузлів. За даними Europump [10], насоси, працюючі з подачами меншими за  $0,5 Q_{onm}$ , можуть бути пошкоджені через нестабільні характеристики й підвищені вібрації.

Згідно закордонного досвіду, стандарт API 610 визначає два діапазони роботи насоса: допустимий і бажаний. Допустимий діапазон роботи насоса знаходиться в межах  $0,5 \dots 1,2 Q_{onm}$ , бажаний –  $0,7 \dots 1,1 Q_{onm}$ . У даному випадку, критеріями обмеження діапазону роботи насоса є: зменшення ККД нижче певного значення, величина допустимого кавітаційного запасу, підвищення рівня шуму й вібрації вище допустимих значень та форма напірної характеристики насоса.

На рис.3 представлена типова напірна характеристика відцентрового насоса, на якій можна виділити чотири характерні режими роботи:

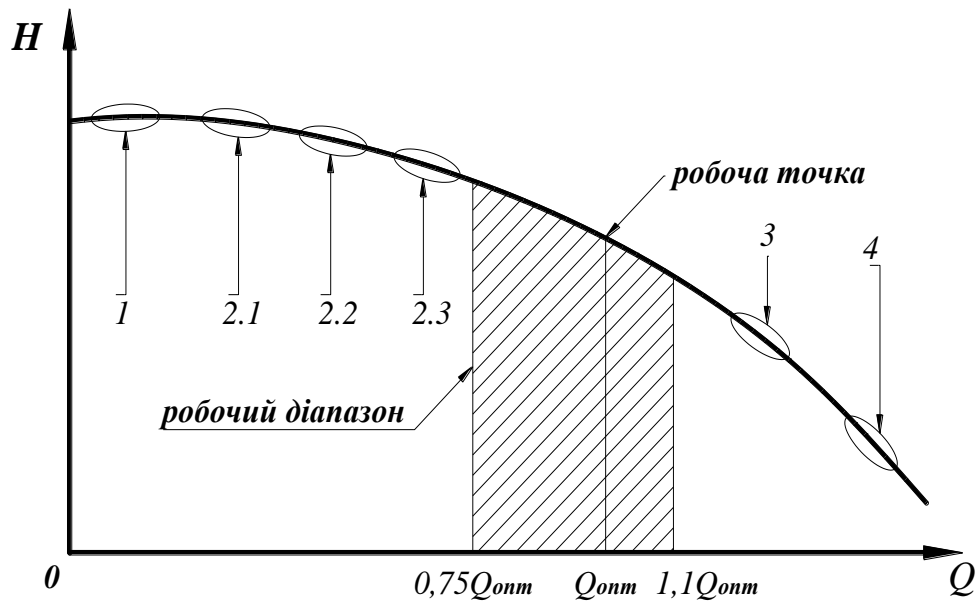


Рис. 3 – Типова характеристика відцентрового насоса

1. Робота з мінімальною витратою, так звана “робота на повністю чи неповністю закриту засувку”, котра виникає при запуску насоса. Робота насоса на даному режимі характеризується суттєвим підвищенням температури перекачуваної рідини.

2. Експлуатація насоса в діапазоні подач лівіше робочого діапазону, як правило виникає при гідравлічному опорі мережі більшому за розрахунковий. При цьому в зоні 2.1 (рис. 3) можлива кавітація, у зонах 2.2, 2.3 можлива рециркуляція потоку на вході чи виході з робочого колеса відповідно. Робота насоса на даному режимі призводить до зниження ресурсу роботи підшипників, ущільнень та насоса в цілому, що призводить до суттєвого зниження ККД.

3. Експлуатація насоса в діапазоні подач правіше робочого діапазону (режим перенавантаження), як правило виникає при гідравлічному опорі мережі меншому за розрахунковий. Робота насоса на даному режимі призводить до зниження ресурсу роботи внаслідок підвищення рівня вібрації, викликаного відривними потоками.

4. Робота при незначному опорі мережі або, як крайній випадок, порив трубопроводу (режим суттєвого перевантаження  $Q = 1,5Q_{онм}$ ).

Робота насоса на даному режимі призводить до кавітації, перевантаження електродвигуна тощо, та характеризується збільшенням енергоспоживання і різким зменшенням ККД.

Робота насоса при подачах відмінних від оптимального режиму призводить до порушення рівномірного розподілу тиску всередині насоса. Такі порушення розподілу тиску призводять до збільшення радіальних сил, що діють на робоче колесо НА, які в свою чергу викликають деформацію вала [9]. Значна деформація вала є причиною скорочення довговічності шпаринних ущільнень і збільшення об'ємних втрат.

При роботі насоса на подачах менших за оптимальну, більша частина енергії, що виробляється робочим колесом, залишається в корпусі і перетворюється в тепло. При роботі на закриту засувку практично вся енергія перетворюється в тепло. Робота насоса у такому режимі призводить до закипання води всередині насоса, що в свою чергу призводить до виходу з ладу окремих вузлів насоса.

#### 4. Впорядкована діаграма подачі насоса

Ефективність роботи насосного обладнання суттєво залежить від режимів водоспоживання. Як правило, режими водоспоживання визначаються багатьма, незалежними одна від одної, причинами: 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 використовувалися впорядковані діаграми водопостачання по аналогії з впорядкованими діаграмами електричних навантажень [11]. Під впорядкованою діаграмою водопостачання розуміється крива, що сполучає розташовані у порядку зростання ординати добових графіків водопостачання за тривалий проміжок часу, наприклад рік, місяць, добу.

Вище вже зазначалося, що формування режимів водоспоживання залежить від низки випадкових факторів, до того ж ці фактори найчастіше є незалежними один від одного. Отже обсяги водоспоживання є також випадковими. Оскільки водоспоживання 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 [11], та підтверджений чисельними дослідженнями водоспоживання на діючих підприємствах різних галузей промисловості і комунального господарства. Причому, нормальний закон розподілу застосовується починаючи з 7-8 споживачів, що входять до групи.

Як відомо з теорії ймовірності, нормальний закон розподілу описується двома числовими характеристиками – середнім значенням водопостачання  $Q_c$  і середньоквадратичним відхиленням  $\sigma$  [12].

Вираз функції розподілу водоспоживання  $Q$  при нормальному законі розподілу [12] має вигляд

$$F(Q) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^Q e^{-\frac{(Q-Q_c)^2}{2\sigma^2}} dQ, \quad (4)$$

де  $Q$  – поточне значення водоспоживання.

Інтегральна крива нормального розподілу згідно (4), представлена на рис. 4 а. Згідно закону нормального розподілу [12], будь-яка величина та її ймовірність, визначаються рівнянням

$$Q = Q_c \pm \beta\sigma$$

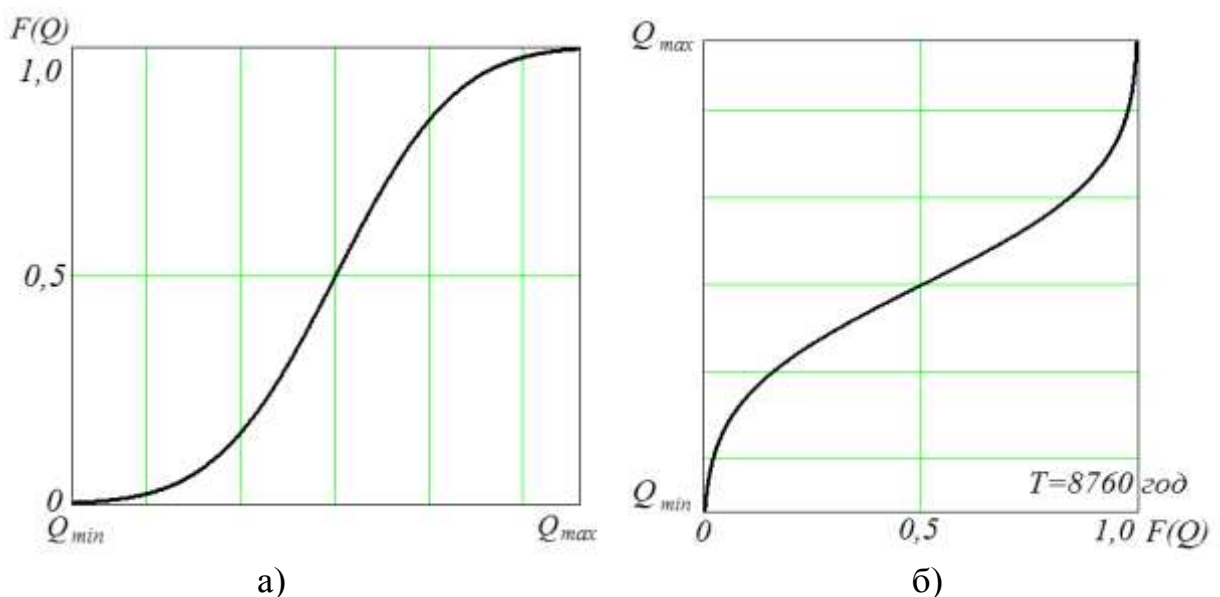


Рис. 4 – Характеристика нормального закону розподілу: а) інтегральна крива нормального розподілу; б) річний графік водоспоживання по напрацюванню

В теорії ймовірності часто використовують «трьохсигмову» ймовірність, тобто ймовірність появи максимального значення водоспоживання  $Q_{max} = Q_c + 3\sigma$  і мінімальної її величини  $Q_{min} = Q_c - 3\sigma$ , цим



значенням відповідають граничні ймовірності 0,001 і 0,999, що зустрічаються вкрай рідко. При визначенні розрахункового максимуму іноді використовують значення  $\beta = 2,5$ , що відповідає ймовірності 0,005, в практичних умовах така точність є достатньою [11].

Повернувши криву на рис. 4 а, на  $90^\circ$  за годинниковою стрілкою і зробивши дзеркальне відображення (у першому квадранті), отримаємо впорядковану діаграму ординат графіка водопостачання, в порядку їх зростання. Якщо за розрахунковий період взяти рік, то значення  $F(Q) = 1$  відповідає 8760 год., тоді така впорядкована діаграма перетворюється на загальновідомий графік водопостачання по напрацюванню (рис. 4 б).

На рис. 5а представлений реальний графік добового водопостачання дванадцятого мікрорайону м. Суми, отриманий на центральному тепловому пункті № 17 (ЦТП-17) м. Суми по вул. Ковпака 47. Дане ЦТП обслуговує 12 дев'яти поверхових житлових будинків, кількість зареєстрованих абонентів становить 1 463 чол. Виміри витрати води проводилися за допомогою ультразвукового портативного витратоміра - лічильника "ВЗЛЕТ-ПР" з реєстрацією даних витрат з інтервалом 30 секунд впродовж 5 діб. На рис. 5б представлена впорядкована діаграма подачі насоса, яку можна апроксимувати експоненціальною функцією типу  $Q(t) = ae^{bt}$ , де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти апроксимації, що характеризують графік добової подачі насосів. Коефіцієнт  $b$  характеризує ступінь нерівномірності подачі, якщо  $b = 0$ , то графік водоспоживання є сталим у часі.

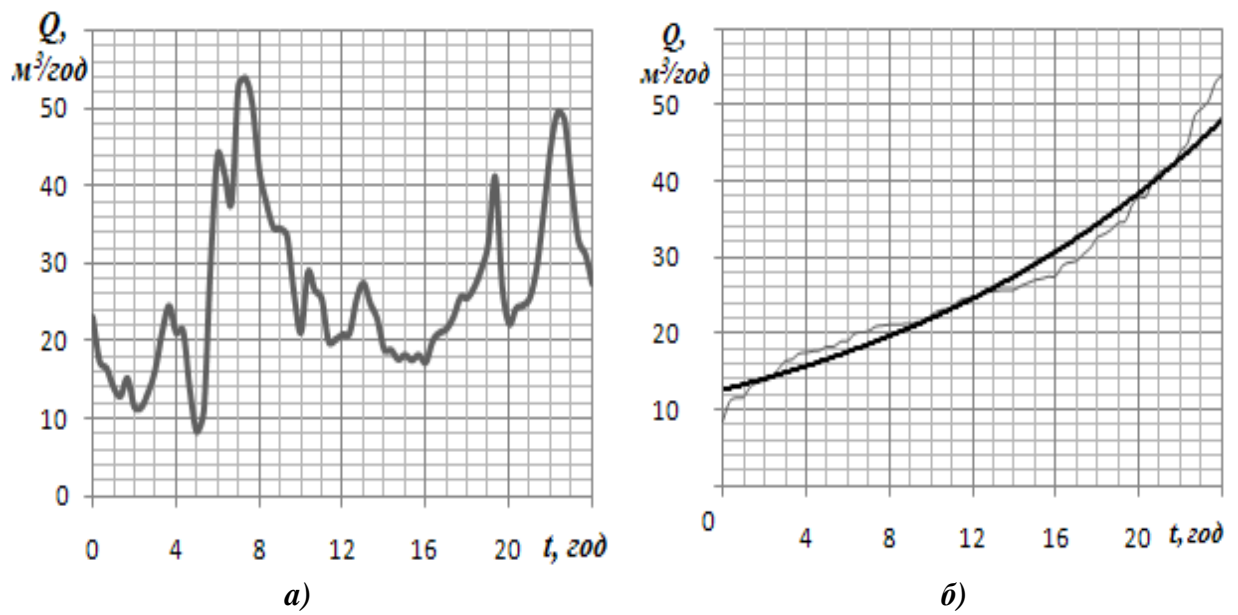


Рис. 5. Добова нерівномірність водоспоживання 12 мікрорайону м. Суми:

а) фактична; б) впорядкована діаграма подачі насосів

Описаний таким чином графік добової подачі насоса дає змогу визначити енергетичні показники режимів роботи насосного обладнання та встановити вплив на них зовнішніх чинників.

## 5. Визначення номінальних параметрів одного насоса, який працює на мережу зі змінним у часі гідравлічним опором

Характеристика опору водопровідної мережі  $H_m$  залежить від параметрів самої мережі і господарської діяльності споживача та технологічних процесів, які її супроводжують. Якщо параметри мережі (довжина, діаметри, шорсткість трубопроводів, геодезичні відмітки насосної станції і споживачів) майже не змінюються у часі, то господарська діяльність має випадковий характер, який зумовлений хаотичністю включення або відключення окремих споживачів (кранів, затворів, тощо). Тому напірна характеристика опору мережі водопостачання (яка залежить від параметрів, значення яких формуються випадковим чином) має складну форму у вигляді сукупності характеристик, що обмежена двома граничними кривими. Нижня гранична крива відповідає характеристиці стану мережі з найменшим гідравлічним опором (при цьому встановлюється режим максимального водоспоживання), верхня – з найбільшим гідравлічним опором (при цьому встановлюється режим мінімального водоспоживання).

Характеристика мережі як залежність між витратою рідини  $Q$  в трубопроводі і напором  $H$ , який необхідний для забезпечення цієї витрати, визначається за [9] як

$$H = a_m + c_m \cdot Q^2, \quad (5)$$

де  $a_m$  – статичний напір, обумовлений різницею геодезичних відміток споживача і водонасосної станції;

$c_m$  – гідравлічний опір мережі.

Для вибору способу апроксимації характеристики реального насоса довільної форми скористаємося наступними міркуваннями. На основі аналізу рівняння нерозривності потоку, основного рівняння лопатевих гідромашин та балансу енергії К. Пфлейдерером, було встановлено аналітичну залежність

між параметрами  $Q$  і  $H$ . Зріз цієї характеристичної поверхні при сталих обертах  $n$  вала ротора насоса дає залежність:

$$H = A + B \cdot Q + C \cdot Q^2, \quad (6)$$

де  $A, B, C$  – константи, що залежать від конструктивного виконання насоса.

Для реального насоса коефіцієнти параболи визначаються за паспортною характеристикою шляхом апроксимації за методом найменших квадратів. При цьому для попереднього аналізу апроксимується вся характеристика, а для безпосереднього використання – її частина в робочому діапазоні.

Характеристика насоса є параболою, гілки якої спрямовані донизу, а точка максимуму зміщена праворуч від початку координат по осі абсцис. З теоретичних досліджень [9] відомо, що робота насоса на низхідній гілці характеристики завжди буде стійкою, робота ж насоса на висхідній гілці характеристики не рекомендується, оскільки в даному випадку можливе виникнення нестійкості і коливальних процесів в роботі насоса та мережі. Зважаючи на те, що насос може працювати у системі водопостачання на довільних режимах, то використовувати насоси з наявною западаючою ділянкою характеристики  $Q$ - $H$  недоцільно.

Враховуючи вищезазначене і обмежившись лише робочою частиною  $Q$ - $H$  характеристики, вираз (6) можна спростити до вигляду:

$$H = a_n + c_n \cdot Q^2, \quad (7)$$

де  $a_n, c_n$ , – константи, що залежать від конструктивного виконання насоса.

Визначимо коефіцієнти апроксимації  $a_n, c_n$  напірної характеристики насоса через координати базової точки  $O$  (в якій параметри насоса  $H_0$  і  $Q_0$ ), і тангенс кута дотичної в цій точці (рис. 6), розв'язавши наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} H_0(Q_0) = a_n + c_n Q_0^2 \\ H'_0(Q_0) = \operatorname{tg} \gamma = 2c_n Q_0 \end{cases} \quad (8)$$

Отримаємо,

$$\begin{cases} a_n = H_0 - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2} \cdot Q_0 \\ c_n = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2 \cdot Q_0} \end{cases} \quad (9)$$

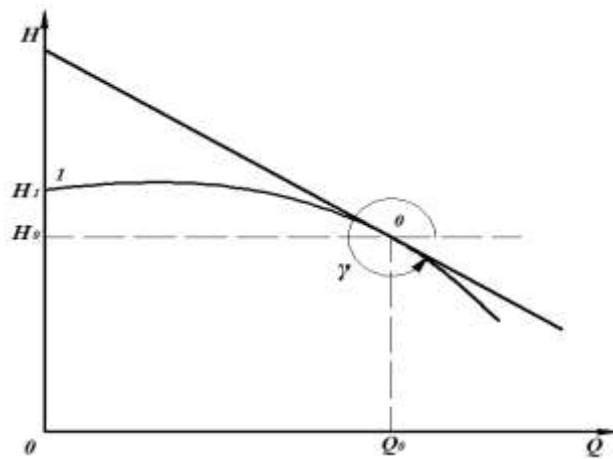


Рис. 6 – До визначення способу апроксимації характеристики насоса

Таким чином враховуючи (7), (9) напірна характеристика насоса при базовій частоті обертання приймає вигляд

$$H(Q) = \left( H_0 - \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2} \cdot Q_0 \right) + \frac{\operatorname{tg} \gamma}{2 \cdot Q_0} \cdot Q^2. \quad (10)$$

Аналітично залежність ККД насоса від його витрати можна подати у вигляді

$$\eta = a_\eta + b_\eta \cdot Q + c_\eta \cdot Q^2, \quad (11)$$

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

Визначити коефіцієнти апроксимації  $a_\eta$ ,  $b_\eta$ ,  $c_\eta$  можна через дані каталогу (максимальне значення ККД  $\eta_m$  і відповідне йому значення витрати  $Q_m$ ) за наступними умовами

$$\begin{cases} \eta(Q_m) = a_\eta + b_\eta \cdot Q_m + c_\eta \cdot Q_m^2 \\ \eta(Q_0) = a_\eta + b_\eta \cdot Q_0 + c_\eta \cdot Q_0^2 \\ \eta'(Q_m) = 0 = b_\eta + 2 \cdot c_\eta \cdot Q_m \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \eta_m = b_\eta \cdot Q_m + c_\eta \cdot Q_m^2 \\ a_\eta = 0 \\ b_\eta = -2 \cdot c_\eta \cdot Q_m \end{cases} \quad .$$

$$\begin{cases} \eta_m = (-2 \cdot c_\eta \cdot Q_m) \cdot Q_m + c_\eta \cdot Q_m^2 \\ a_\eta = 0 \\ b_\eta = -2 \cdot c_\eta \cdot Q_m \end{cases} \quad .$$

Отже, коефіцієнти апроксимації  $a_\eta$ ,  $b_\eta$ ,  $c_\eta$  для залежності  $\eta = f(Q)$  через дані каталогів визначаються як

$$\begin{cases} b_\eta = 2 \cdot \frac{\eta_m}{Q_0} \\ a_\eta = 0 \\ c_\eta = -\frac{\eta_m}{Q_0^2} \end{cases} \quad (13)$$

Таким чином підставляючи (13) в (11), аналітична залежність ККД насоса від його витрати приймає вигляд

$$\eta = 2 \cdot \frac{\eta_m}{Q_0} \cdot Q - \frac{\eta_m}{Q_0^2} \cdot Q^2,$$

або

$$\eta = \frac{\eta_m \cdot Q \cdot (2 \cdot Q_0 - Q)}{Q_0^2}. \quad (14)$$

Для економічного обґрунтування прийняття різних управлінських рішень при виборі оптимальних параметрів насоса основним критерієм є величина спожитої електроенергії, котра визначається як:

$$N(t) = \int_0^t \frac{\rho g Q(t) H(Q, t)}{\eta(Q, t)} dt. \quad (15)$$

Підставляючи в (15) залежності (10), (14) та залежність витрати від часу  $Q(t) = ae^{bt}$ , отримаємо значення спожитої електроенергії впродовж розглядуваного проміжку часу  $t_1$ :

$$N = \frac{\rho g}{\eta_m} \int_0^{t_1} \frac{\left( H_m - \frac{tg\gamma}{2} Q_m + \frac{tg\gamma}{2Q_m} a^2 e^{2bt} \right) Q_0^2}{2Q_0 - ae^{bt}} dt. \quad (16)$$

Таким чином, спожите значення електроенергії впродовж розглядуваного проміжку часу  $t$  залежить від максимального значення водоспоживання  $Q_m$ , значення напору при цьому водоспоживанні  $H_m$ , крутизни напірної характеристики насоса, що характеризується  $tg\gamma$ , значенням максимального ККД насоса  $\eta_m$  та подачі насоса  $Q_0$  при цьому ККД.

Аналітичний розв'язок залежності (16) отримати складно, але для його аналізу скористаємося наступними міркуваннями. При виборі різних варіантів параметрів насоса, його напір при максимальному водопостачанні  $Q_m$  повинен бути не меншим  $H_m$ , в іншому випадку якість водозабезпечення буде незадовільною. При забезпеченні всього діапазону зміни водоспоживання одним насосом, його витрата при максимальному ККД

повинна підкорятися умові  $0,5Q_m < Q_0 < Q_m$ , в іншому випадку один насос не зможе забезпечити весь діапазон зміни подач при необхідному значенні  $H_m$ .

Визначимо відносне енергоспоживання  $N^*$  як відношення енергоспоживання при довільних параметрах насоса  $N$  до енергоспоживання при виборі насоса на максимальне значення водоспоживання.

Енергоспоживання, за умови вибору насоса на максимальне значення водоспоживання, визначається аналогічно (16), за умови що  $Q_0 = Q_m$ :

$$N_m = \frac{\rho g}{\eta_m} \int_0^{t_1} \frac{\left( H_m - \frac{tg\gamma}{2} Q_m + \frac{tg\gamma}{2Q_m} a^2 e^{2bt} \right) Q_m^2}{2Q_m - ae^{bt}} dt \quad (17)$$

Прийнявши, що  $Q_0 = kQ_m$ , та  $Q_m = ae^{bt_1}$  та враховуючи залежності (16) і (17), відносне енергоспоживання матиме вигляд:

$$N^* = \frac{\int_0^{t_1} \frac{\left( H_m - \frac{tg\gamma}{2} ae^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} ae^{b(2t-t_1)} \right) k^2 ae^{2bt_1}}{2ke^{bt_1} - e^{bt}} dt}{\int_0^{t_1} \frac{\left( H_m - \frac{tg\gamma}{2} ae^{bt} + \frac{tg\gamma}{2} ae^{b(2t-t_1)} \right) ae^{2bt_1}}{2e^{bt_1} - e^{bt}} dt} \quad (18)$$

На рис. 7 приведена впорядкована діаграма водоспоживання в залежності від коефіцієнта нерівномірності  $b$ . На рис. 8 представлена геометрична інтерпретація залежності зміни відносного енергоспоживання від ступені нерівномірності водоспоживання, при значенні кута нахилу напірної характеристики насоса  $\gamma = 5$ . Аналіз даної залежності показує, що різним значення ступеня нерівномірності водоспоживання відповідають різні значення номінальної подачі  $Q_0$  при забезпеченні мінімального енергоспоживання.

На рис. 8а наведена безрозмірна напірна характеристика насоса при різних значеннях тангенсу кута нахилу дотичної в базовій точці. На рис. 8б



представлена геометрична інтерпретація залежності зміни відносного енергоспоживання від тангенсу кута нахилу напірної характеристики насоса, при ступені нерівномірності водоспоживання  $b = 0,12$ . Аналіз даної залежності показує, що зі збільшенням крутизни напірної характеристики насоса збільшується питоме енергоспоживання. Тому для забезпечення мінімального енергоспоживання при роботі одного насоса на мережу зі змінним опором у часі можна сформулювати вимогу до напірної характеристики насоса, яка полягає у зменшенні крутизни ( $tg\gamma$ ) напірної характеристики.

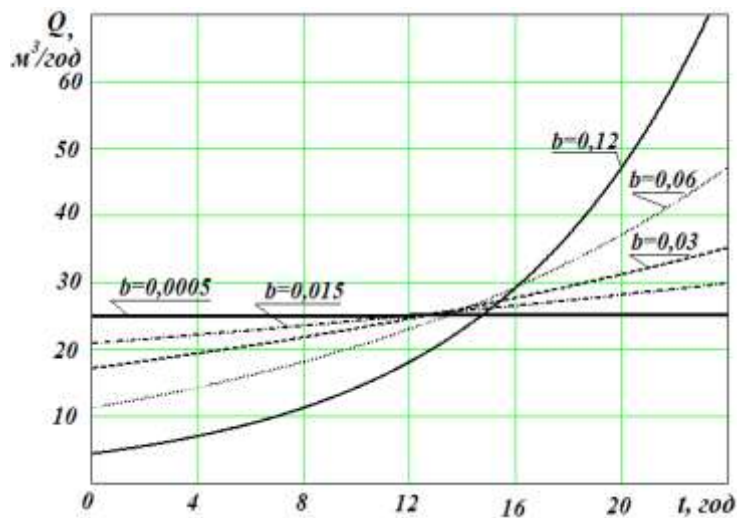


Рис. 7 – Впорядкована діаграма водоспоживання в залежності від ступені нерівномірності водоспоживання  $b$ .

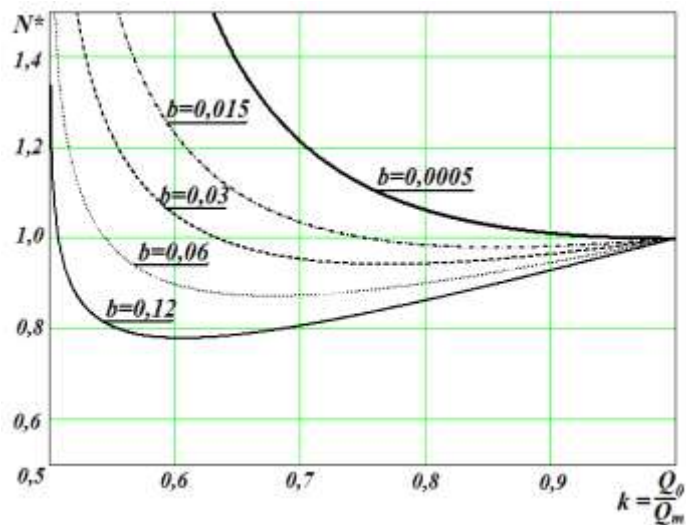


Рис. 8 – Залежності зміни відносного енергоспоживання від ступені нерівномірності водоспоживання  $b$

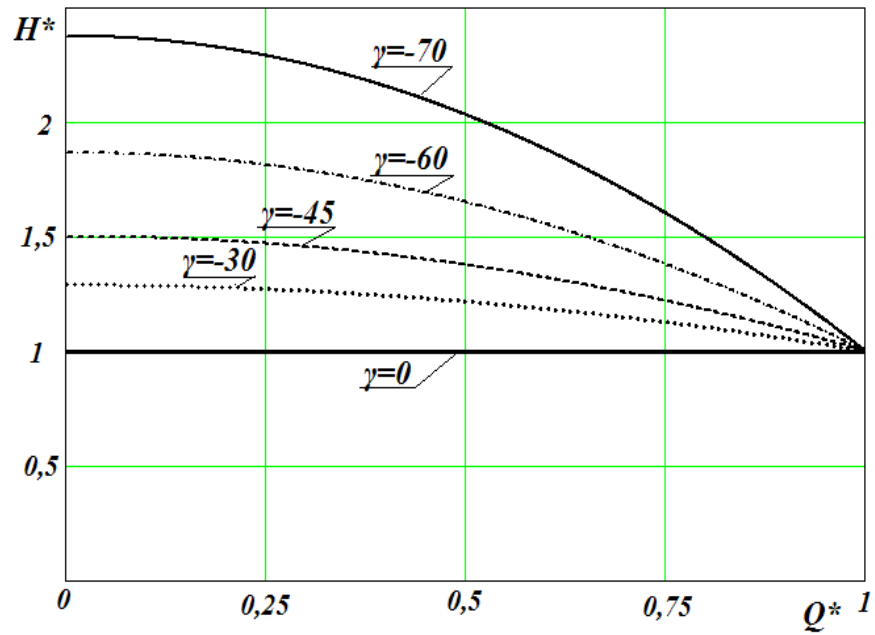


Рис. 9. –Безрозмірна напірна характеристика насоса при різних значеннях кута нахилу дотичної в базовій точці.

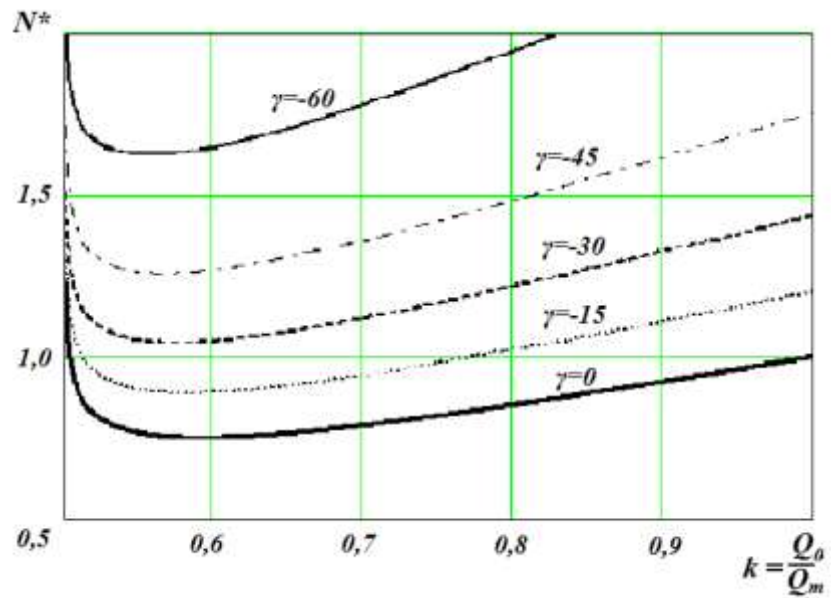


Рис. 10 – Залежності зміни відносного енергоспоживання від тангенсу кута нахилу напірної характеристики насоса  $\gamma$

## ВИСНОВКИ

1. Обґрунтовано застосування впорядкованих діаграм водоспоживання застосування яких дозволяє розробляти математичні моделі робочого процесу для проведення узагальненого аналізу режимів роботи насосів при їх експлуатації.

2. Розроблено формалізовану 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бойко В.С. Энергоефективная насосная станция третьего подъема / В.С.Бойко , Н.И. Сотник, И.Н. Сотник // Техническая термодинамика. – 2005. – № 3. – С.62–65.
2. Белан А.Е. Технология водоснабжения / Белан А.Е. – К.: Наук. думка, 1985. – 265 с.
3. Національної доповіді “Про якість питної води та стан водопостачання в Україні у 2008 році” [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://minregionbud.gov.ua/doccatalog/>
4. Николенко И.В. Методика оценки технико-экономической эффективности гидромашин насосных станций систем водоснабжения и водотведения / И.В. Николенко, Э.И. Салиев, Е.М. Валкина // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. Серия Технические науки. – Симферополь: НИЦ КИПУ, 2008. – № 16. – С.22 – 25.
5. Николаев В. Г. Энергосберегающие методы управления режимами работы насосных установок систем водоснабжения и водоотведения: автореф. дис. на соискание ученой степени доктора техн. наук: спец. 05.23.04 “Водоснабжение, канализация” / В. Г. Николаев. – М, 2010. – 46с.
6. Абрамов Н.Н. Расчет водопроводных сетей: учеб. пособие для вузов / Абрамов Н.Н., Поспелова М.М., Сомов М.А. – М.: Стройиздат, 1983. – 278 с.
7. Внутренний водопровод и канализация зданий: СНиП 2.04.01–85. – [Действительный от 1986–01–01]. – М.: Госстандарт СССР, 1986 – 72 с. – (межгосударственный стандарт).
8. Журба М.Г. Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: учебное пособие. / Журба М.Г., Соколов Л.И., Говорова

Ж.М. – М.: Издательство АСВ, 2003. – 288 с.

9. Малюшенко В.В Энергетические насосы: Справочное пособие / Малюшенко В.В. Михайлов А.К. – М.: Энергоиздат, 1981. – 200с.

10. Operating rotodynamic pumps away from design conditions / European Association of Pump Manufacturers. – Oxford: Elsevier Advanced Technology, – 2000. – 52 p.

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

12. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пос. / Гмурман В. Е.– [6-е изд., стереотип]. – М. :Высшая школа, 1998. – 479 с.