

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ**

**ХОМУТЕЦЬКА ТЕТЯНА ПЕТРІВНА**



УДК 628.112 : 658.26 : 621.31

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ І ПРАКТИЧНИХ ЗАСАД  
ЕНЕРГООЩАДНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ  
З ПІДЗЕМНИХ ДЖЕРЕЛ**

05.23.04 – Водопостачання, каналізація

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор  
**ГУГАЙ АНАТОЛІЙ МИХАЙЛОВИЧ**,  
професор кафедри водопостачання та водовідведення  
Київського національного університету будівництва і  
архітектури

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**ТКАЧУК ОЛЕКСАНДР АНДРІЙОВИЧ**,  
завідувач кафедри міського будівництва і  
господарства Національного університету водного  
господарства і природокористування (м. Рівне)

доктор технічних наук, професор,  
**НОВОХАТНІЙ ВАЛЕРІЙ ГАВРИЛОВИЧ**,  
професор кафедри прикладної екології та  
природокористування Національного університету  
"Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка"

доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник **ПОПОВ ВІКТОР МИКОЛАЙОВИЧ**,  
головний науковий співробітник відділу  
інформаційних технологій та маркетингу інновацій  
Інституту водних проблем і меліорації (м. Київ)

Захист дисертації відбудеться "17" червня 2020 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.26.056.07 при Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, к.466.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий "14" травня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д.26.056.07,  
д.т.н, доцент



Т.М.Ткаченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні системи водопостачання характеризуються високою енергоємністю, тому в структурі собівартості води одну з найвагоміших часток, як правило, становлять витрати за споживану електроенергію, насамперед, насосними агрегатами. Як показали дослідження, питомі витрати електроенергії на виробництво і подачу води в Україні мають високі показники, що потребує розробки і впровадження на водопровідних системах заходів енергозбереження.

При водопостачанні з підземних джерел найчастіше застосовують системи з водозабірними свердловинами, які є найбільш складними для розрахунків сумісної роботи споруд гідравлічної взаємодії, оскільки в таких системах необхідно враховувати ще й гідрогеологічний вплив, які здійснюють свердловин одна на одну, що призводить до додаткових знижень рівнів води в них, зростання висоти водопідйому, а отже і енергоспоживання.

Нині при виборі технологічних схем водопроводів з підземних джерел і експлуатаційних режимів їхньої роботи не враховуються зміни характеристик споруд у процесі експлуатації, що є причиною виникнення протиріч між проектними та реальними показниками роботи системи, незабезпечення споживачів розрахунковими напорами і витратами води, перевитратам електроенергії через роботу насосів за межами рекомендованого застосування, тобто з низькими коефіцієнтами корисної дії.

Відсутність до цього часу науково обґрунтованої розрахункової бази для визначення доцільного складу споруд і найвигідніших з економічної точки зору режимів їхньої роботи з урахуванням зміни протягом часу як розмірів водоспоживання, так і характеристик самих споруд, змушує приймати при проектуванні та експлуатації довільні інженерні рішення, які можуть не забезпечити ефективну роботу водопровідної системи. У цьому аспекті актуальним є розвиток наукових основ з удосконалення існуючого та розроблення нового науково-методичного забезпечення, яке б дало можливість здійснювати імітаційне моделювання роботи систем водопостачання з експериментуванням на комп'ютері, аналізуванням отриманих результатів за різними можливими варіантами водозабезпечення та вибором найбільш доцільних режимів роботи споруд, що даватимуть значний енергозберігаючий та економічний ефект при гарантованому забезпеченні споживачів розрахунковими витратами і напорами води.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалась згідно державної програми «Про концепцію розвитку водного господарства України» і тісно пов'язана з планами держбюджетної тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0115U005088, 0199U000661).

**Мета роботи** полягає в науковому обґрунтуванні й розробці більш ефективних і досконалих методів розрахунку сумісної роботи водопровідних споруд з урахуванням зміни їхніх характеристик у процесі експлуатації системи та запровадженні заходів для забезпечення енергоощадного водопостачання з підземних джерел.

**Завдання досліджень:**

– провести аналіз сучасного стану господарсько-питного водопостачання та обґрунтувати можливості його поліпшення за рахунок розширеного використання підземних вод;

– проаналізувати існуючі методи розрахунку взаємодіючих водопровідних споруд при заборі води з напірних і безнапірних водоносних пластів, провести теоретичні та експериментальні дослідження впливу часу на зміну характеристик насосів, трубопроводів, фільтрів свердловин тощо;

– розробити методи розрахунків сумісної роботи споруд системи водопостачання, що живиться напірними і безнапірними підземними водами, з урахуванням зміни характеристик споруд під час експлуатації;

– дослідити роботу автоматизованих водопровідних систем з гідропневматичними установками, встановити залежності для розрахунку основних параметрів таких систем з метою забезпечення економічного режиму їх роботи;

– обґрунтувати заходи ресурсозбереження в системах водопостачання із залізовміщуючих водоносних пластів;

– удосконалити методи розрахунку сумісної роботи насосів, водопровідних мереж і резервуарів в баштових та безбаштових системах водопостачання для визначення енергоощадних режимів експлуатації споруд при зміні водоспоживання;

– розробити імітаційну модель роботи водопровідної системи та метод імітаційного моделювання, що дозволяє встановити склад і режими експлуатації споруд при мінімізації питомого енергоспоживання за умов забезпечення розрахункових витрат і напорів води в системі водопостачання;

– провести дослідно-виробничу апробацію отриманих розрахункових рекомендацій та впровадити результати досліджень у виробничу практику.

**Об'єкт дослідження** – процес функціонування систем господарсько-питного водопостачання з підземних джерел.

**Предмет дослідження** – енергоощадність сумісної роботи водопровідних споруд у процесі експлуатації.

**Методи дослідження** – фізичне і математичне моделювання процесів сумісної роботи споруд при заборі підземних вод та їх очищенні, подачі, транспортуванні і розподілі в системах господарсько-питного водопостачання, використання чисельних і аналітичних методів визначення параметрів вказаних процесів, використання дослідних даних, одержаних в лабораторних і виробничих умовах, для апробації запропонованих методів розрахунку.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що в дисертації *вперше*:

- на основі теоретичних і експериментальних досліджень науково обґрунтовано методологічні засади енергоощадного водопостачання з підземних джерел в умовах динамічної зміни характеристик споруд та обсягів водоспоживання;

- запропоновано структуру узагальненої імітаційної моделі роботи водопровідної системи, що включає визначення гідравлічних і енергетичних показників та питомого енергоспоживання при забезпеченні розрахункових витрат і напорів води;

- науково обґрунтовано та розроблено метод імітаційного моделювання сумісної роботи взаємодіючих споруд системи водопостачання, що дозволяє аналізувати різні варіанти водозабезпечення та встановити склад і режими експлуатації споруд при мінімізації питомих витрат електроенергії на подачу води споживачам;

- проведено оцінку ефективності роботи водозабірних свердловин в напірних і безнапірних водоносних пластах при змінах в процесі експлуатації системи їхніх характеристик;

- розроблено числові та аналітичні методи розрахунків всіх споруд системи водопостачання з підземних джерел при врахуванні впливу часу на зміну гідравлічних і енергетичних характеристик споруд (насосів, трубопроводів, фільтрів свердловин тощо).

*Отримали подальший розвиток:*

- теорія і методи розрахунків сумісної роботи насосів, водопровідних мереж і резервуарів в баштових та безбаштових системах водопостачання;

- теоретичні дослідження роботи автоматизованих водопровідних систем з гідропневматичними установками, на основі яких встановлено залежності для визначення параметрів, що забезпечують економічний режим роботи насосів;

- наукове обґрунтування ресурсозберігаючих засад при заборі води із залізозміщуючих пластів, що здійснені на основі теоретичного узагальнення результатів експериментальних досліджень, які підтвердили доцільність застосування нових технологічних схем і конструкцій водознезалізнювальних станцій та фільтрів водозабірних свердловин.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практична цінність наукових досліджень полягає в створенні більш досконалих інженерних методів розрахунку сумісної роботи водопровідних споруд, при яких враховується зміна їхніх характеристик під час експлуатації, що дозволяє при різних обсягах водоспоживання забезпечити енергоощадну роботу діючих систем водопостачання як в звичайному режимі, так і при можливому виникненні позаштатних ситуацій з необхідністю використання резервних свердловин.

Запропоновані заходи ресурсозбереження в системах господарсько-питного водопостачання із залізозміщуючих водоносних пластів дають

можливість зменшити питоме енергоспоживання при відкачуванні води із свердловин і шахтних колодязів та знизити питомі капітальні і експлуатаційні витрати при очищенні підземних вод з використанням розроблених і захищених патентами на винахід нових конструкцій водознезалізнювальних установок.

Метод імітаційного моделювання апробовано на діючих системах водопостачання з підземних джерел. Його використання дозволяє в умовах зміни водоспоживання, враховуючи різні фактори, серед низки можливих варіантів визначати доцільний склад, схему і режими роботи водопровідних споруд з найменшими капітальними та експлуатаційними затратами, а також обґрунтовувати доцільність застосування багатозонних тарифів на електроенергію. Надані рекомендації з вибору енергоощадних режимів роботи споруд КП "Чернігівводоканал" дали змогу зменшити енергоспоживання та заощадити значні кошти експлуатаційних витрат підприємства. Наукові розробки використано на МКП "Бердичівводоканал" і ВКП "Обухівводоканал" для поліпшення роботи діючих систем водопостачання і зниження питомих витрат електроенергії на подачу води споживачам.

Результати одержаних наукових досліджень впроваджено в ПАТ «Укрводпроект» (м. Київ) з метою використання при розробці проектів систем водопостачання з підземних джерел для забезпечення енергоощадної роботи водопровідних споруд. Окремі результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес у Київському національному університеті будівництва і архітектури та використовуються при наукових дослідженнях студентів.

**Особистий внесок автора.** Основні наукові ідеї і положення теоретичних і експериментальних досліджень розроблені і сформульовані автором особисто. Досліджено фактори, що впливають на зміну подачі води із водозабірних свердловин у процесі їх експлуатації, проведено оцінку їх впливу на роботу системи водопостачання та розроблено методи розрахунку подачі води з напірних і безнапірних водоносних пластів з врахуванням зміни характеристик споруд. Здобувачем проведено порівняльний аналіз різних способів визначення регульованих об'ємів води в резервуарах; досліджено і удосконалено методи розрахунку систем подачі і розподілу води за різними схемами баштової та безбаштової мережі; розроблено рекомендації із заходів енергозбереження при заборі води із залізовміщуючих пластів. Автору належить теоретична частина досліджень з питань створення імітаційної моделі роботи системи водопостачання та розробки методу імітаційного моделювання, що дозволяє встановити енергоощадні режими експлуатації споруд. Особисто автором проведено розрахунки сумісної роботи споруд в діючих системах водопостачання при різних варіантах експлуатації водозабірних свердловин та насосних станцій другого підняття для мінімізації питомих витрат електроенергії. Здобувачем особисто виконано узагальнення всіх результатів досліджень та розроблено рекомендації щодо забезпечення енергоощадного водопостачання з підземних джерел.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень і окремі розділи дисертації доповідались на: Науково-практичних конференціях Київського національного університету будівництва і архітектури (м. Київ, 2011-2018рр.); Міжнародних конгресах «ЕТЕВК» (Ялта, 2007р., 2009р., 2011р., 2013р., Іллічівськ, 2015р.); Науково-практичних конференціях Харківського національного університету будівництва і архітектури (2013р., 2017р.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми охорони і раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод» (Миргород, 2010-2013рр.); Науково-практичній конференції «Сучасні проблеми охорони довкілля та раціонального використання ресурсів у водному господарстві» (Одеса, 2011р.); Міжнародній науково-практичній конференції "Водні ресурси України та меліорація земель" (Київ, 2013р.); Міжнародних науково-практичних конференціях "Водокористування: технології, споруди, менеджмент" (м. Київ, 2014р., 2015р.); III Міжнародній науково-практичній конференції "Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти" (Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", 2015р.); Науковому семінарі Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, березень 2017р.); Науковому семінарі Харківського національного університету будівництва і архітектури (м. Харків, травень 2017р.).

**Публікації.** Основні результати роботи опубліковано в 40 наукових працях, у тому числі: 2 монографії, 35 статей, з них: 20 у фахових виданнях України та 5 у міжнародних періодичних виданнях, отримано 2 патенти України на корисну модель та 1 патент на винахід.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація включає вступ, сім розділів, загальні висновки, список використаних джерел із 344 найменувань, додатки. Роботу викладено на 260 сторінках основного тексту, включаючи 50 таблиць і 96 рисунків, всього 389 сторінок.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі досліджень, викладено наукову і практичну цінність дисертації, наведено відомості про апробацію результатів роботи.

У **першому розділі** досліджено сучасний стан господарсько-питного водопостачання в Україні та визначено перспективи його поліпшення.

Встановлено, що понад 60% систем водопостачання в Україні базуються на використанні води з поверхневих джерел. Однак зарегулювання стоку і значне антропогенне навантаження стало причиною суттєвого погіршення якості поверхневих вод. Разом з тим значно посилені вимоги ДСанПіН 2.2.4-171-10 до якості водопровідної води порівняно з попередніми нормативами, а тому діючі технології водопідготовки з поверхневих джерел не завжди здатні забезпечити потрібну якість очищеної води.

Комунальним підприємствам притаманна велика спрацьованість основних фондів, насамперед водопровідних мереж, що призводить до значних втрат і вторинного забруднення води, а зміна норм і режимів водоспоживання в населених пунктах та характеристик водопровідних споруд гідравлічної взаємодії при експлуатації призводять до створення надлишкових тисків в системі водопостачання та зростання її аварійності, а також до незабезпечення споживачів потрібними витратами і напорами води та збільшення матеріальних і моральних збитків. Значна частина діючого насосного обладнання в Україні потребує заміни чи реконструкції, оскільки робота насосів перебуває поза межами рекомендованого застосування, тобто з низькими ккд і високим енергоспоживанням, а тому питомі витрати електроенергії на подачу води в багатьох регіонах країни продовжують залишатися на високому рівні.

Одним із шляхів поліпшення ситуації може бути розширене використання води з підземних джерел для питних потреб та забезпечення енергоощадного водопостачання, що досягається завдяки використанню раціональних схем, енергозберігаючих технологій і сучасного ефективного обладнання, матеріалів і засобів на всьому шляху транспортування води від водного джерела до споживача, а також здійснення імітаційного моделювання роботи гідравлічно взаємодіючих споруд з урахуванням зміни їхніх характеристик протягом часу експлуатації, аналізу отриманих результатів розрахунку при різних можливих варіантах подачі розрахункових витрат води й визначення енергозберігаючих режимів роботи споруд.

Вивченню роботи водозабірних свердловин та розробці методів їх розрахунку присвятили свої наукові праці Веригін М.М., Бочевєр Ф.М., Усенко В.С., Пивовар М.Г., Олексієв В.С., Гаврилко В.М., Тєсля В.Г., Олійник О.Я., Тугай А.М., Прокопчук І.Т., Береговий Ю.О., Тугай Я.А., Поляков В.Л. та ін.

Значний внесок у розв'язання проблеми удосконалення технологій водопідготовки та інтенсифікації процесів очищення підземних вод в системах питного водопостачання зробили вчені: Клячко В.А., Апельцин І.Е, Мінц Д.М., Ніколадзе Г.І., Кастальський А.А., Аюкаєв Р.І., Грабовський П.О., Прогульний В.Й., Мельцер В.З., Гвоздяк П.І., Глоба Л.І., Душкін С.С., Журба М.Г., Говорова Ж.М., Епоян С.М., Гомеля М.Д., Гіроль М.М., Терновцев В.О., Олійник О.Я., Орлов В.О., Квартенко О.М., Мартинов С.Ю., Асс Г.Ю., Станкявічус В.Н., Хоружий П.Д., Brow I., Clark R., Vadjo I., Grochmann A. та ін.

Розробці й удосконаленню методів виконання гідравлічних і техніко-економічних розрахунків споруд СПРВ присвятили свої наукові дослідження відомі вітчизняні та зарубіжні вчені: Лобачов В.Г., Андріяшев М.М., Ільїн В.Г., Абрамов Н.Н., Мошнін Л.Ф., Шевелєв Ф.О., Койда Н.У., Новохатній В.Г., Хоружий П.Д., Ткачук О.А., Петросов В.А., Кожинов І.В., Сумароков С.В., Ільїн Ю.А., Сомов М.А., Белан А.Е., Шадура В.О., Косінов В.П., Кізеєв М.Д., Новицька О.С., Кросс Х., Вейсбах Х., Фріман І., Люгер М., Dandy G.C., Lambert A., Murphy L.J., Fantozzi M., Simpson A.R. та ін.



Вирішенням актуальних проблем енергозбереження у водогосподарській галузі та забезпечення ефективної роботи насосних станцій займались Коваленко П.І., Попов В.М., Багаєв Ю.Г., Лобачев П.В., Лезнов Б.С., Нікітін А.М., Новохатній В.Г., Залуцький Е.В., Мінаєв А.В., Карелін В.Я., Шмиголь В.В., Турк В.І., Черносивтов М.Д., Bunn S., Savic D., Walters G. та ін.

З огляду літературних джерел зроблено висновок, що наукові дослідження вчених були в основному присвячені удосконаленню методики розрахунку систем для умовно заданого поточкорозподілу і допущенні деяких середніх гідравлічних і енергетичних характеристик споруд без врахування їх зміни протягом часу експлуатації. Щоб уникнути невідповідності експлуатаційних показників роботи системи і розрахункових значень, отриманих під час проектування, необхідно при моделюванні роботи споруд систем подачі і розподілу води (СПРВ) враховувати закономірності зміни їх характеристик у процесі експлуатації, а для мінімізації експлуатаційних витрат виконувати розрахунки сумісної роботи всіх споруд СПРВ на різні терміни її експлуатації. Тому потребують розробки чи удосконалення методи розрахунків сумісної роботи гідравлічно взаємодіючих споруд систем водопостачання.

У **другому розділі** виконано аналіз теорії притоку води до досконалих свердловин в напірних і безнапірних водоносних пластах; розглянуто види недосконалості свердловин та методи розрахунку сумісної роботи споруд при заборі підземних вод.

У напірному водоносному пласті приток води до досконалої свердловини визначається за формулою Дюпюї, а зниження рівня води в ній, м, буде залежати тільки від втрати напору у водоносному пласті. У недосконалих свердловинах розрізняють два види недосконалості, що впливають на їхні фільтраційні опори: за ступенем і за характером розкриття водоносного пласта, відповідно,  $\xi_1$  і  $\xi_2$ . Для такої свердловини зниження рівня води в ній  $\Delta h_c$ , м, буде залежати від втрат напору як у водоносному пласті, так і у фільтрі:

$$\Delta h_c = h_{\pi} + h_{\phi} = \frac{Q \ln(R/r)}{6,28K_{\phi}m} + \frac{Q(\xi_1 + \xi_2)}{6,28K_{\phi}m}, \quad (1)$$

де  $Q$  – подача води із свердловини, м<sup>3</sup>/добу;  $R$  і  $r$  – радіуси, м, відповідно, депресійної воронки і свердловини;  $m$  і  $K_{\phi}$  – відповідно, потужність, м, і коефіцієнт фільтрації, м/добу, водоносного пласта;  $h_{\pi}$  і  $h_{\phi}$  – втрати напору, м, відповідно, у водоносному пласті і фільтрі.

Опір  $\xi_1$ , що залежить від довжини та розташування фільтра у водоносному пласті, проникності та потужності пласта, в процесі експлуатації свердловини не змінюється, а опір  $\xi_2$ , що залежить від конструкції фільтра і стану його закольматованості, в процесі експлуатації свердловини зростає внаслідок обростання фільтра осадами, що виносяться з пласта або виділяються з води. Отже, дебіт недосконалої свердловини у напірному пласті, м<sup>3</sup>/добу:

$$Q = \frac{6,28K_{\phi} \cdot m \cdot \Delta h_c}{\ln(R/r) + \xi_1 + \xi_2} = K_t q \Delta h_c, \quad (2)$$

де  $q$  – питомий дебіт свердловини, м<sup>2</sup>/добу;  $K_t$  – коефіцієнт зменшення питомого дебіту свердловини внаслідок її недосконалості.

На рис.1 наведено результати теоретичних досліджень, що ілюструють залежність зміни коефіцієнта  $K_t$  та втрат напору у фільтрі  $h_\phi$  при збільшенні фільтраційного опору  $\xi_2$  в процесі експлуатації свердловини.

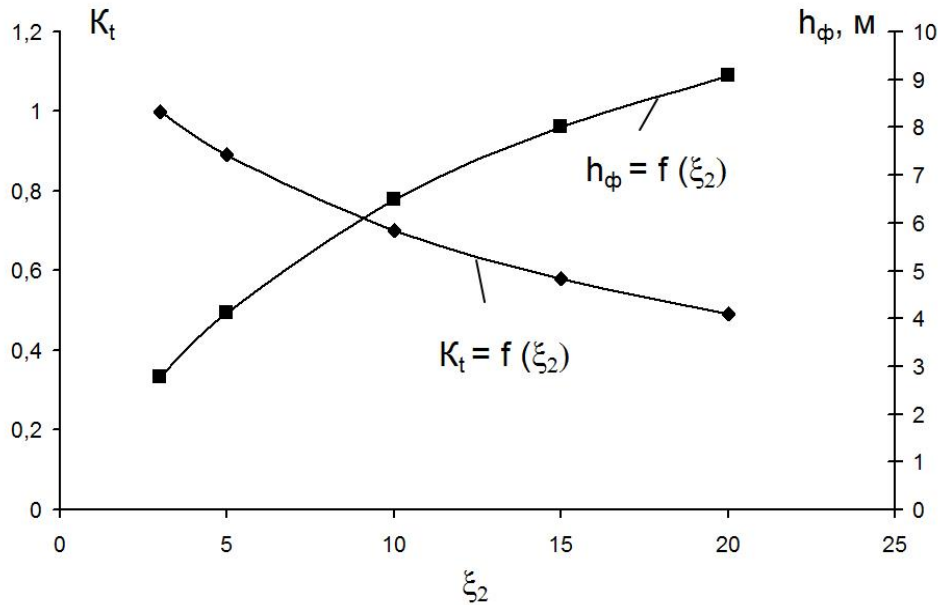


Рис. 1. Графіки залежності коефіцієнта  $K_t$  і втрат напору у фільтрі  $h_\phi$  від фільтраційного опору  $\xi_2$

Проаналізовано графічний (рис.2) та аналітичний методи розрахунку подачі води із свердловини в напірний резервуар, що запропонував проф. В.Г.Ільїн. Якщо апроксимувати гідравлічну характеристику відцентрових насосів (лінія 1 рис.2) рівнянням квадратної параболи

$$H = H_\phi - S_\phi Q^2, \quad (3)$$

у якій  $H_\phi$  і  $S_\phi$  – параметри, що обчислюються за формулами

$$H_\phi = H_1 + S_\phi Q_1^2 = H_2 + S_\phi Q_2^2, \quad (4)$$

$$S_\phi = \frac{H_1 - H_2}{Q_2^2 - Q_1^2}, \quad (5)$$

де  $H_1$  і  $H_2$  – напори насоса, м, при подачі ним витрат води, відповідно,  $Q_1$  і  $Q_2$ , л/с, які приймають із характеристики  $Q$ - $H$  насоса в зоні його рекомендованого застосування з найвищим ккд, то подачу води зі свердловини, л/с, можна визначити за формулою

$$Q = \frac{-1/q + \sqrt{(1/q)^2 + 4(H_\phi - H_\Gamma)(S_k + S_b + S_\phi)}}{2(S_k + S_b + S_\phi)}, \quad (6)$$

де  $H_\Gamma$  – геометрична висота водопідйому від статичного рівня води в свердловині  $Z_{ст}$  до розрахункового рівня води в напірному резервуарі, м;  $S_k$  і  $S_b$  – гідравлічні опори, відповідно, у комунікаціях насосної установки і водоводі, (с/л)<sup>2</sup>м.

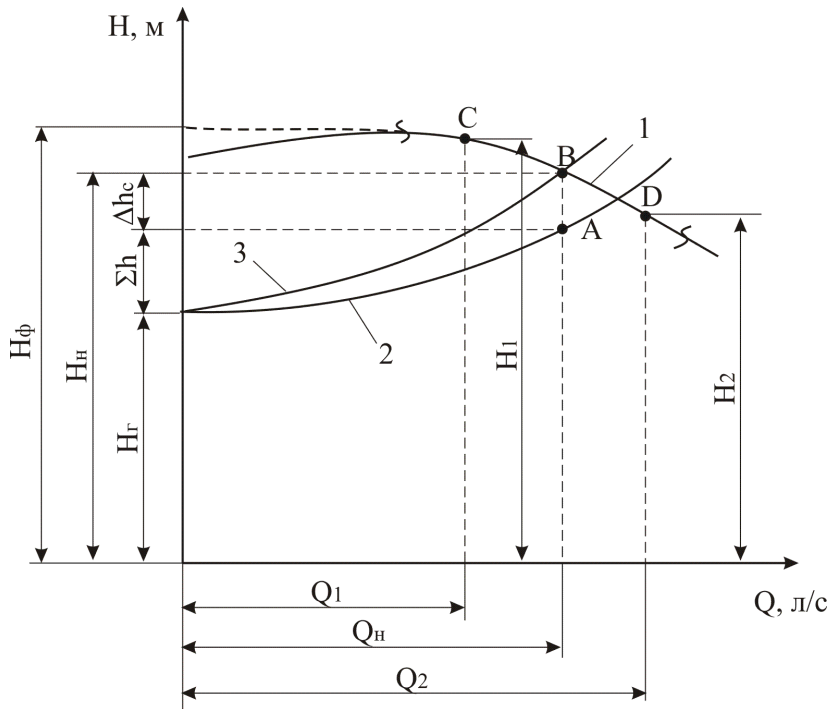


Рис. 2. Графічний розрахунок подачі води із свердловини в напірний резервуар:

- 1 – характеристика  $Q$ - $H$  заглибного насоса;
- 2 – гідравлічна характеристика шляху руху води від всмоктуючих отворів насоса до напірного резервуара при статичному рівні води в свердловині;
- 3 – те саме, з урахуванням зниження рівня  $\Delta h_c$

Така теорія отримала подальший розвиток при дослідженнях роботи групи взаємодіючих свердловин, що забирають воду з напірних пластів та впливають одна на одну. Подачу води, л/с, від кожної такої свердловини можна визначити шляхом ітерацій за формулою

$$Q_i = \frac{-1/q_i\beta_i + \sqrt{(1/q_i\beta_i)^2 + 4(H_{\phi,i} - H_{г,i})(S_{к,i} + S_{в,i} + S_{\phi,i})}}{2(S_{к,i} + S_{в,i} + S_{\phi,i})}, \quad (7)$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнт, що враховує додаткове зниження рівня води в свердловині внаслідок відкачування води із сусідніх взаємодіючих свердловин;  $S_{в,i}$  – умовний гідравлічний опір усіх загальних ділянок водоводу,  $(\text{с/л})^2\text{м}$ .

Аналогічні дослідження сумісної роботи споруд проведено і для випадків забору води з безнапірних водоносних пластів. Так, при розрахунку недосконалої свердловини також необхідно враховувати фільтраційні опори  $\xi_1$  і  $\xi_2$ . Тоді витрату води з неї,  $\text{м}^3/\text{добу}$ , можна визначити за формулою

$$Q = \frac{\pi K_{\phi} (H_{ст}^2 - H_{дин}^2)}{\ln \frac{R}{r} + \xi_1 + \xi_2} = \frac{1,36 K_{\phi} (2H_{ст} - \Delta h_c) \Delta h_c}{\lg \frac{R}{r} + 0,43(\xi_1 + \xi_2)}, \quad (8)$$

де  $H_{ст}$  і  $H_{дин}$  – відповідно глибина статичного та динамічного рівнів води у свердловині від водоупора, м.

Опір  $\xi_1$  в таких системах залежить від співвідношення довжини фільтра  $l$  до середньої глибини рівня води у пласті в межах депресійної воронки, а фільтраційний опір  $\xi_2$  при експлуатації свердловини збільшується і для його орієнтовного розрахунку запропоновано залежність

$$\xi_{2,i} = \frac{3,16 K_{\phi} (2H_{ст} - \Delta h_{c,i}) \Delta h_{c,i}}{Q_i} - 2,3 \lg \frac{R}{r}. \quad (9)$$

Зниження рівня води в свердловині при заборі води з безнапірного водоносного пласта, м, можна визначити за рівнянням

$$\Delta h_c = H_{cr} - \sqrt{H_{cr}^2 - PQ}, \quad (10)$$

в якому параметр  $P$ , год/м, обчислюють за формулою

$$P = \frac{\ln \frac{R}{r} + \xi_y}{2\pi K_\phi} = \frac{\lg \frac{R}{r} + 0,43\xi_y}{1,36K_\phi}, \quad (11)$$

$\xi_y$  – узагальнений фільтраційний опір, що враховує недосконалість свердловин.

Графічний та аналітичний методи розрахунку водопровідних систем досліджували і при заборі води з безнапірних водоносних пластів. Враховуючи залежності (3)-(5), подачу води насосом із свердловини, яка живиться безнапірними підземними водами, л/с, можна визначити за формулою:

$$Q_n = \sqrt{\frac{H_\phi - H_r - \Delta h_c}{S_\phi + S_k + S_b}}. \quad (12)$$

Оскільки у ній два невідомих ( $Q_n$  і  $\Delta h_c$ ), то задача вирішується методом ітерацій: за формулою (11) визначається параметр  $P$ ; орієнтовно приймається значення  $Q_{n,i}$  і визначається величина  $\Delta h_{c,i}$ ; за формулою (12) уточнюється подача насоса  $Q_{n,(i+1)}$  і порівнюється із значенням  $Q_{n,i}$ ; розрахунок закінчується коли розбіжність між ними не перевищуватиме допустимої нев'язки  $\Delta Q$ .

Розглянуто питання щодо проектування групи водозабірних свердловин при заборі води з безнапірних пластів, розрахунку можливого дебіту недосконалих свердловин, визначення їх потрібної кількості та розміщення за різними можливими схемами подачі води у збірний резервуар. При збільшенні кількості свердловин, що приєднуються до однієї лінії водоводу, та зменшенні відстані між ними буде зменшуватись загальна довжина водоводів, а отже і їх будівельна вартість, але посилюватись взаємний гідрогеологічний вплив свердловин одна на одну, що призводить до додаткового зниження динамічного рівня води в свердловинах і збільшення висоти підйому води, зменшення витрат води із кожної свердловини та зростання енерговитрат. Для техніко-економічного обґрунтування проектних рішень розроблено метод розрахунку таких систем, що дозволяє аналізувати отримані результати за різними схемами подачі води та визначати найбільш економічно доцільний варіант.

Досліджено сумісну роботу споруд з гідропневматичною установкою змінного тиску при заборі води насосом із шахтного колодязя. Перед включенням насоса (рис.3, 4) зниження рівня води в колодязі буде мінімальним ( $\Delta h_{c,min}$ ), подача насоса в момент включення буде максимальною ( $Q_{n,max}$ ), а приток води в колодязь із водоносного пласта буде мінімальним ( $Q_{k,min}$ ). За період роботи насоса між його включенням і виключенням ці витрати води будуть несталими: у насоса подача зменшується від  $Q_{n,max}$  до  $Q_{n,min}$ ; у колодязя приток води збільшується від  $Q_{k,min}$  до  $Q_{k,max}$ . Рівність витрат води у насоса і в колодязя буде відбуватися лише перед виключенням насоса, коли  $Q_{n,min} = Q_{k,max}$ .

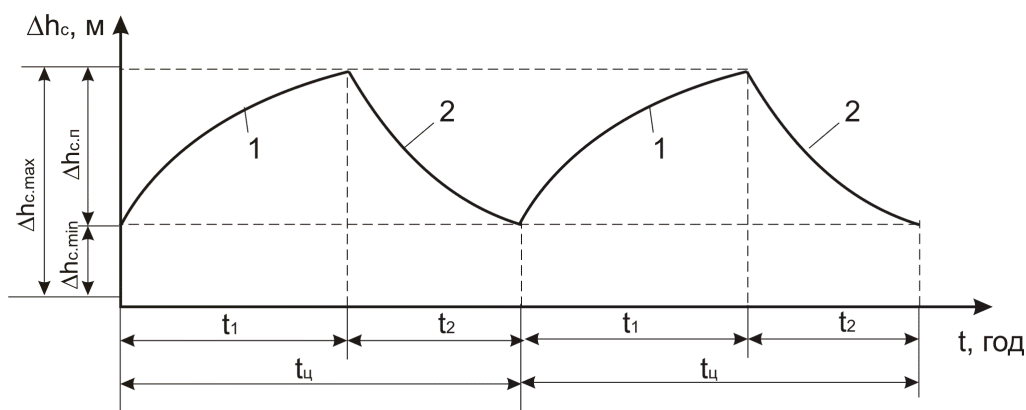


Рис. 3. Графіки зміни знижень статичного рівня води в шахтному колодязі протягом циклу роботи установки: 1 – при включеному насосі тривалістю  $t_1$ ; 2 – при виключеному насосі тривалістю  $t_2$

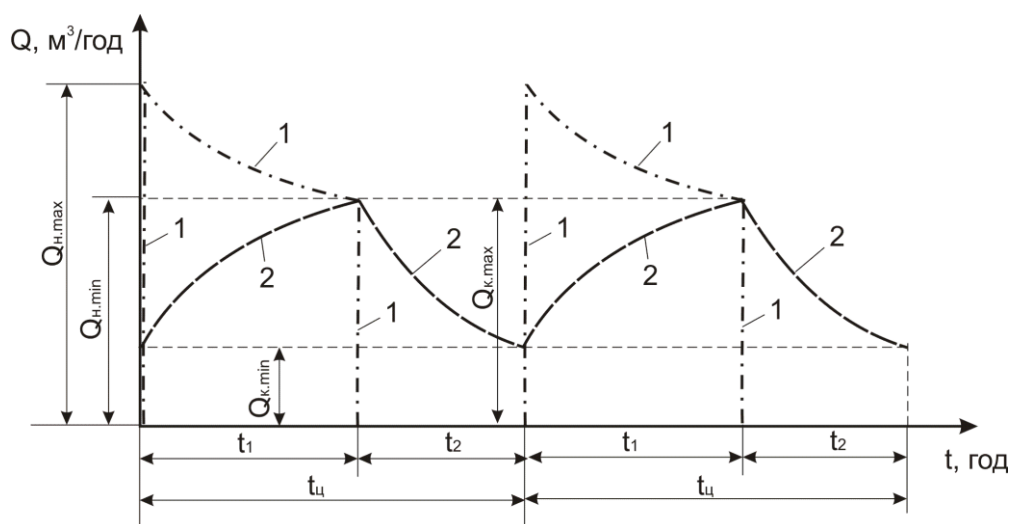


Рис. 4. Зміна витрат води насоса і шахтного колодязя протягом циклу їх роботи: 1 – подача води насосом; 2 – надходження води в колодязь із пласта

Запропоновано метод розрахунку таких систем, що дозволяє встановити основні параметри, при яких забезпечується енергоощадна робота споруд. Розрахунки виконують шляхом ітераційних обчислень або побудови графіків залежності притоку води в колодязь і подачі води з нього насосом від величини зниження статичного рівня води в колодязі (рис. 5). Координати точки  $A$ , що утворюється при перетині графіків 1 і 2, визначають значення максимального зниження статичного рівня води в колодязі  $\Delta h_{c,max}$  (абсциса) і мінімальної подачі води насосом  $Q_{н,min}$  (ордината).

Величина мінімального зниження статичного рівня води в колодязі, м:

$$\Delta h_{c,min} = H_{ст} - \sqrt{H_{ст}^2 - \frac{\Delta h_{c,max} (2H_{ст} - \Delta h_{c,max})}{\exp \frac{y t_2 \Delta h_{c,max}}{\omega_k}}}, \quad (13)$$

де  $\omega_k$  – площа поперечного перерізу шахтного колодязя,  $m^2$ ;  $Y$  – параметр,  $m/добу$ , що визначає умови надходження води із пласта у колодязь:

$$Y = \frac{\pi K_{\phi}}{\ln \frac{1,65R}{r} + \xi_k}, \quad (14)$$

$\xi_k$  – фільтраційний опір, зумовлений недосконалістю колодязя.

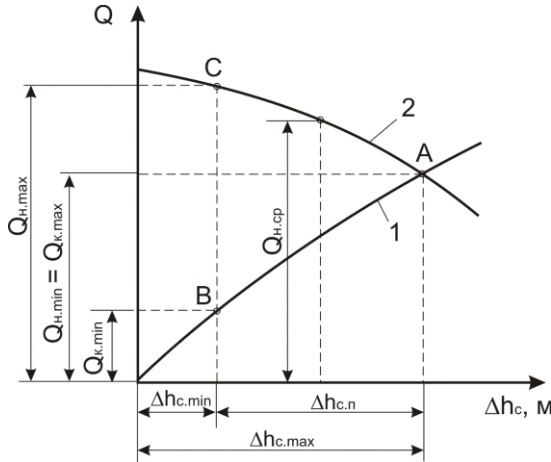


Рис. 5. Графіки залежності притоку води в колодязь (1) і подачі води з нього насосом (2) від величини зниження статичного рівня води в колодязі  $\Delta h_c$

Тривалість циклу роботи системи між включеннями насоса  $t_{ц,i}$ , год, при водоспоживанні в  $i$ -ту годину витрати  $Q_{м,i}$  та кількість включень насоса у цю годину  $n_i$ ,  $год^{-1}$ , обчислюють за рівняннями

$$t_{ц,i} = t_{1,i} + t_{2,i} = W_{пер} \left( \frac{1}{Q_{н,ср} - Q_{м,i}} + \frac{1}{Q_{м,i}} \right), \quad (15)$$

$$n_i = \frac{1}{t_{ц,i}} = \frac{Q_{м,i} (Q_{н,ср} - Q_{м,i})}{W_{пер} Q_{н,ср}}, \quad (16)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  – тривалість роботи системи, год, відповідно, при включеному і виключеному насосі;  $W_{пер}$  – регулюючий об'єм води в баку,  $m^3$ ;  $Q_{н,ср}$  – середня подача насоса,  $m^3/год$ , за період між його включенням і виключенням.

Насос і розміри гідропневматичного бака слід розраховувати таким чином, щоб максимальна і мінімальна подачі насоса, відповідно, під час його включення і виключення знаходились у зоні рекомендованого застосування даного насоса, тобто з найвищими значеннями ккд (рис.б):

$$Q_{н,мін} = \alpha \sqrt{H_{\phi} - (H_{г,макс} + \Delta h_{с,макс} + 102P_{макс})}; \quad (17)$$

$$Q_{н,макс} = \alpha \sqrt{H_{\phi} - (H_{г,мін} + \Delta h_{с,мін} + 102P_{мін})}, \quad (18)$$

де  $H_{г,мін}$  і  $H_{г,макс}$  – відповідно, мінімальна і максимальна геометрична висота водопідйому, м;  $P_{мін}$  і  $P_{макс}$  – відповідно, мінімальний і максимальний тиск у баку установки, МПа;  $\alpha$  – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{S_{\phi} + S_k}}. \quad (19)$$

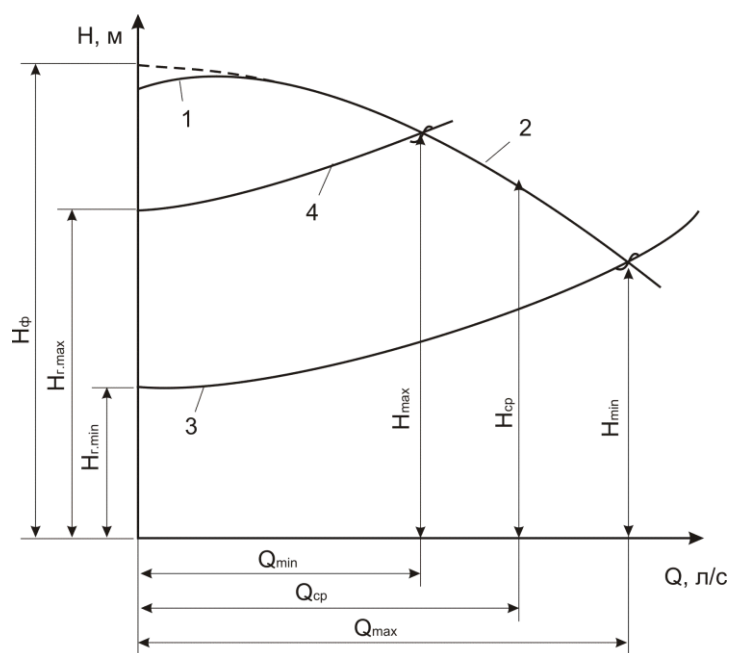


Рис. 6. Графіки сумісної роботи колодязя, насоса і водоповітряного бака

- 1 – гідрвалічна характеристика  $Q-H$  насоса;  
 2 – зона рекомендованого застосування роботи насоса;  
 3 – характеристика водопровідної системи при  $P_{\min}$ ;  
 4 – те саме, при  $P_{\max}$

У **третьому розділі** представлено результати досліджень автором впливу часу на зміну гідрвалічних характеристик споруд водопровідної системи при заборі води з напірних і безнапірних водоносних пластів.

Встановлено, що при заборі води з напірних водоносних горизонтів (рис.7) внаслідок зниження статичного рівня води у свердловині на величину  $\Delta H_r$  геометрична висота водопідйому зростає від  $H_{r,0}$  до  $H_{r,t}$ ; через зменшення питомого дебіту свердловини в результаті збільшення гідрвалічних опорів фільтра зниження води в свердловині збільшується від  $\Delta h_{c,0}$  до  $\Delta h_{c,t}$ ; внаслідок зростання гідрвалічних опорів трубопроводів втрати напору при транспортуванні ними води змінюються від  $\Sigma h_0$  до  $\Sigma h_t$ ; через погіршення гідрвалічної характеристики  $Q-H$  спрацьованого насоса показник  $H_{\phi,0}$  зменшується до  $H_{\phi,t}$  на величину  $\Delta H_{\phi}$ . В результаті комплексної дії всіх цих факторів подача води із свердловини зменшується з величини  $Q_0$  на початку її роботи до  $Q_t$  через термін часу  $t$  її експлуатації.

Вплив різних факторів на зміну подачі води з свердловин досліджували, аналізуючи коефіцієнти зростання гідрвалічних опорів у процесі експлуатації:

- фільтра свердловини

$$K_1 = \frac{q_0}{q_t} = \frac{\lg(R/r) + 0,43(\xi_1 + \xi_{2,t})}{\lg(R/r) + 0,43(\xi_1 + \xi_{2,0})}; \quad (20)$$

- насоса

$$K_2 = \frac{H_{\phi,0}}{H_{\phi,t}}; \quad (21)$$

- трубопроводів

$$K_3 = \frac{\Sigma S_t}{\Sigma S_0}, \text{ де } \Sigma S = S_{\phi} + S_k + S_b. \quad (22)$$

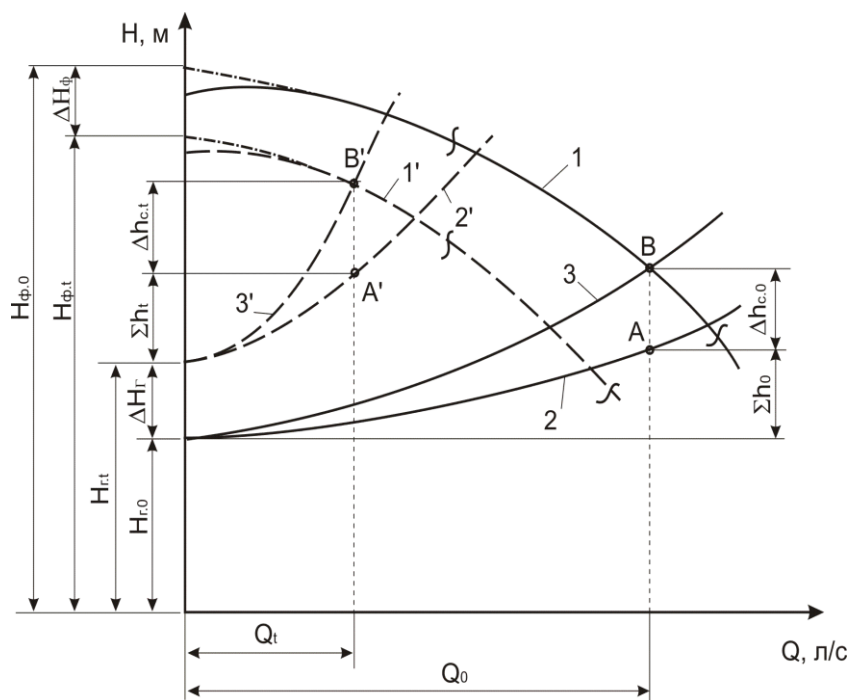


Рис. 7. Графіки  $Q-H$  характеристик водопровідних споруд на початку їх експлуатації та через термін часу  $t$ : 1 і 1' – відповідно, нового і спрацьованого насоса; 2 і 2' – трубопроводної системи, відповідно, нової та експлуатованої; 3 і 3' – те саме, з урахуванням зниження рівня води в свердловині

Таким чином, подача води із свердловини в напірних пластах, л/с, на початку її експлуатації

$$Q_0 = \frac{-1/q_0 + \sqrt{(1/q_0)^2 + 4(H_{\phi,0} - H_r)\Sigma S_0}}{2\Sigma S_0}, \quad (23)$$

а через термін часу  $t$  при сумісній дії всіх факторів впливу

$$Q_t = \frac{-K_1/q_0 + \sqrt{(K_1/q_0)^2 + 4(H_{\phi,0}/K_2 - H_r)K_3\Sigma S_0}}{2K_3\Sigma S_0}. \quad (24)$$

Дослідження автора показали, що найбільший вплив на зниження подачі води із свердловини здійснюється через спрацювання деталей насоса (рис.8).

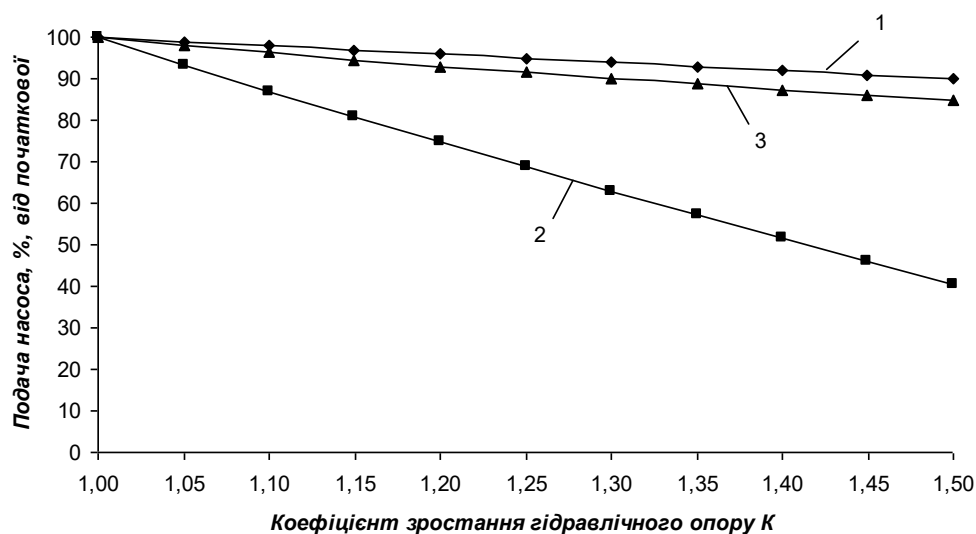


Рис. 8. Графіки зменшення подачі води із свердловини при зростанні гідравлічних опорів: 1 – фільтра свердловини; 2 – насоса; 3 – трубопроводів



При цьому встановлено, що при експлуатації заглибних відцентрових насосів величина  $S_{\phi}$  з гідравлічної характеристики залишається практично незмінною, а зменшується лише параметр  $H_{\phi}$ .

Результати досліджень збільшення питомих витрат електроенергії при зростанні гідравлічних опорів у фільтрі свердловини та трубопроводах наведено на рис.9.

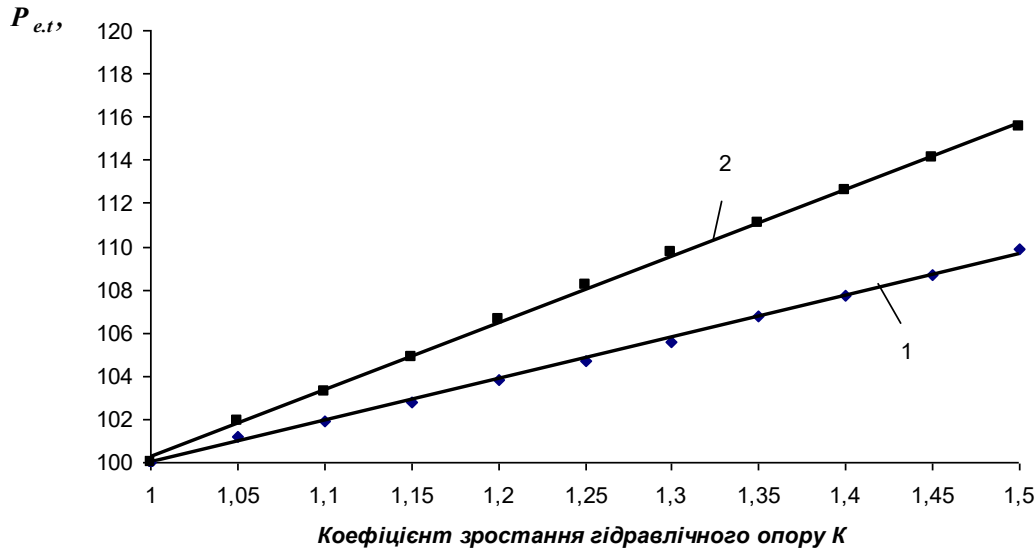


Рис. 9. Графіки збільшення питомих витрат електроенергії при зростанні гідравлічних опорів: 1 – у фільтрі свердловини; 2 – в напірних трубопроводах

За період експлуатації свердловини строком  $t$  відбувається додаткове збільшення величини узагальненого фільтраційного опору  $\xi_y$  на величину  $\Delta\xi_{yt}$ :  
 $\xi_{yt} = \xi_y + \Delta\xi_{yt}$ .

Знаючи характеристику водоносного пласта та питоми дебіти свердловини на початку  $q$  і через певний строк експлуатації  $q_t$ , можна визначити величину  $\Delta\xi_{yt}$  за цей період. Приймаючи для практичних розрахунків  $\Sigma S_t \approx \Sigma S$ , відносну подачу води із свердловини, в % від початкової величини, обчислювали як

$$P_t = \frac{-1/q_t + \sqrt{(1/q_t)^2 + 4\alpha_t(H_{\phi} - H_{\Gamma})\Sigma S}}{-1/q + \sqrt{(1/q)^2 + 4(H_{\phi} - H_{\Gamma})\Sigma S}} \cdot 100\% , \quad (25)$$

у якій значення  $\alpha_t$  розраховували за формулою

$$\alpha_t = \frac{H_{\phi,0} - H_{\Gamma,0}}{H_{\phi,t} - H_{\Gamma,t}} , \quad (26)$$

де  $H_{\phi}$  і  $H_{\Gamma}$  – відповідно, параметр характеристики  $Q$ - $H$  насоса і геометрична висота водопідйому на початку роботи свердловини;  $H_{\phi,t}$  і  $H_{\Gamma,t}$  – те саме, після певного терміну її експлуатації.

Результати цих досліджень наведено на рис. 10 і 11.

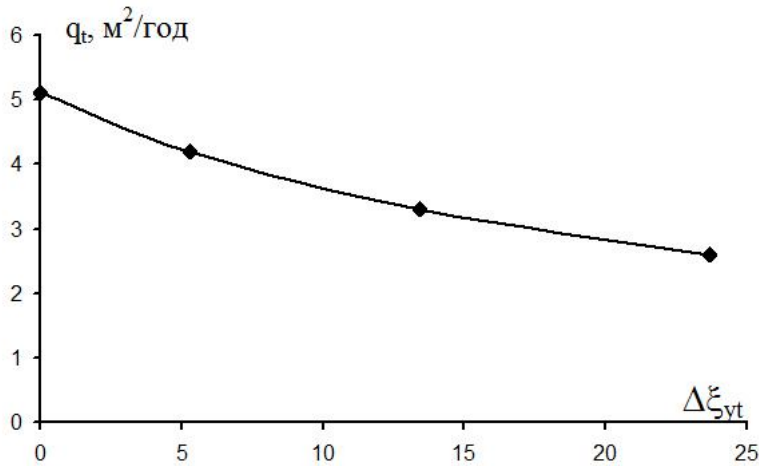


Рис. 10. Графік залежності питомого дебіту свердловини від її додаткового фільтраційного опору  $q_t = f(\Delta \xi_{yt})$

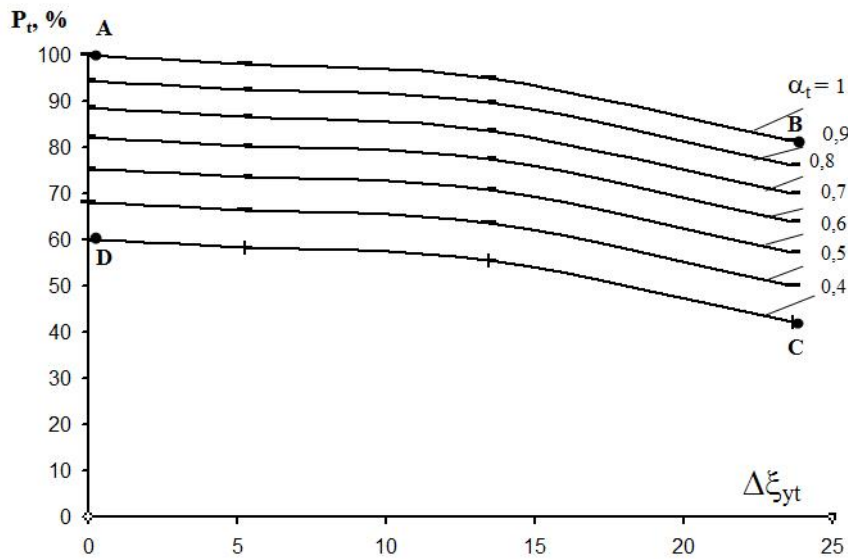


Рис. 11. Графік залежності  $P_t = f(\alpha_t; \Delta \xi_{yt})$

При заборі води з безнапірних водоносних пластів характеристики споруд у процесі експлуатації також змінюються (рис.12). Подача води, л/с, із старої свердловини:

$$Q'_H = \sqrt{\frac{H'_\phi - H'_\Gamma - \Delta h'_c}{S'_\phi + S'_k + S'_B}} \quad (27)$$

Встановлено, що на подачу води із свердловин, які забирають воду з безнапірних пластів, головним чином, впливають такі фактори: падіння статичного рівня у водоносному пласті внаслідок надмірного відкачування води з нього при недостатньому поповненні, що призводить до зростання величини  $H'_\Gamma$ ; збільшення гідравлічного опору фільтрів та прифільтрової зони внаслідок кольматації осадам, що зменшує питомий дебіт та збільшує зниження води в свердловині  $\Delta h'_c$ ; зменшення напорів насоса та величини  $H'_\phi$  внаслідок фізичного спрацювання його деталей. Гідравлічні опори споруд  $S'_\phi$ ,  $S'_k$  і  $S'_B$  змінюються мало і для практичних розрахунків їх можна вважати стабільними, тобто  $\Sigma S = S'_\phi + S'_k + S'_B \approx \Sigma S' = S'_\phi + S'_k + S'_B = const$ .

Тоді прийнявши  $\frac{H'_\phi - H'_r}{H_\phi - H_r} = \alpha$  та  $\frac{\Delta h'_c}{\Delta h_c} = \beta$  подачу води із старої свердловини, л/с, можна визначити за формулою

$$Q'_H = \sqrt{\frac{\alpha(H_\phi - H_r) - \beta\Delta h_c}{\Sigma S}}. \quad (28)$$

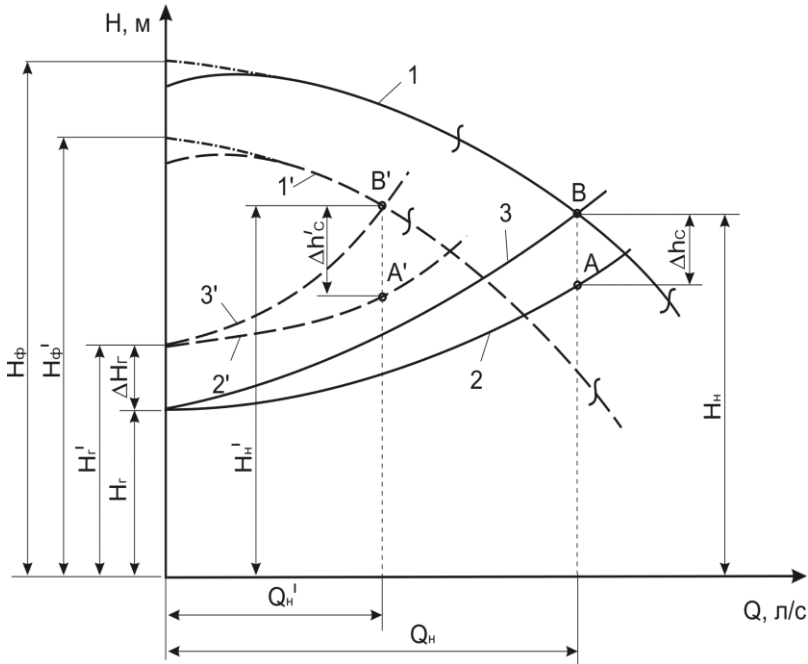


Рис. 12. Гідравлічні характеристики  $Q-H$  водопровідних споруд: 1 і 1' – відповідно, нового і спрацьованого насоса; 2 і 2' – напірного трубопроводу від насоса до башти, відповідно, для нової і експлуатованої свердловини; 3 і 3' – те саме, з урахуванням зниження рівня води в свердловині  $\Delta h_c$

Параметр  $\alpha$  залежить від стану фізичного спрацювання деталей заглибного насоса ( $H_\phi$ ) та зниження відмітки статичного рівня води в пласті ( $H_r$ ). Оскільки у процесі експлуатації свердловини величина  $H_\phi$  зменшується, а висота  $H_r$  збільшується, то коефіцієнт  $\alpha \leq 1$ .

Внаслідок кольматації фільтра і прифільтрової зони свердловини, що забирає воду з безнапірних пластів, узагальнений фільтраційний опір  $\xi'_y$  теж збільшується

$$\xi'_y = \xi_y + \Delta\xi_y, \quad (29)$$

де  $\Delta\xi_y$  – додатковий фільтраційний опір свердловини.

Параметр, що визначається за формулою (11), в нових умовах внаслідок кольматації свердловини у процесі експлуатації збільшиться на величину  $\Delta P$ :

$$P' = \frac{\ln \frac{R}{r} + \xi_y + \Delta\xi_y}{2\pi K_\phi} = P + \Delta P. \quad (30)$$

У випадку, коли  $H_\phi - H_r = const$  для кожного значення  $\Delta h_{c,i}$  цей параметр визначається за формулою

$$P_i = \frac{\Delta h_{c,i}(2H_{cr} - \Delta h_{c,i})\sqrt{\Sigma S}}{\sqrt{H_\phi - H_r - \Delta h_{c,i}}}. \quad (31)$$

Відносна подача води, в % від початкового значення, із свердловини, що забирає воду з безнапірних пластів:

$$\Pi_{i,j} = 100 \cdot \sqrt{\frac{\alpha_i (H_\phi - H_r) - \beta_j \Delta h_c}{(H_\phi - H_r) - \Delta h_c}} \quad (32)$$

Результати досліджень показано на графіках зміни глибини зниження рівнів води в свердловині  $\Delta h_c$ , параметра  $P$  і подачі води  $\Pi$  залежно від збільшення додаткового фільтраційного опору  $\Delta \xi_y$ , що виникає внаслідок відкладання осаду у фільтрі і прифільтровій зоні свердловини (рис. 13), а також проілюстровано на графіках залежності подачі води із свердловини  $\Pi$  і зниження рівня води в ній  $\Delta h_c$  від параметрів  $\alpha$  і  $P$  (рис.14).

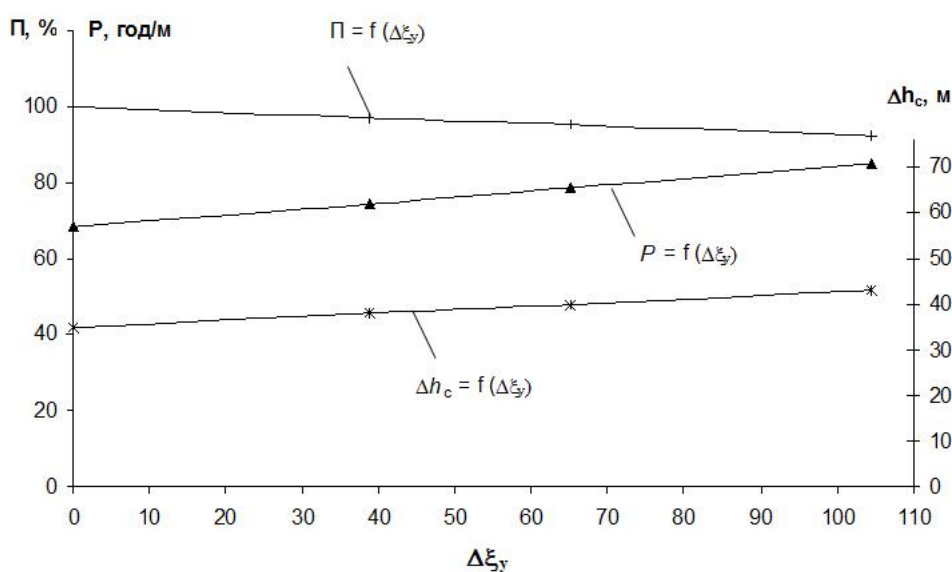


Рис.13. Графіки залежності показників роботи свердловини від величини збільшення фільтраційного опору фільтра і прифільтрової зони

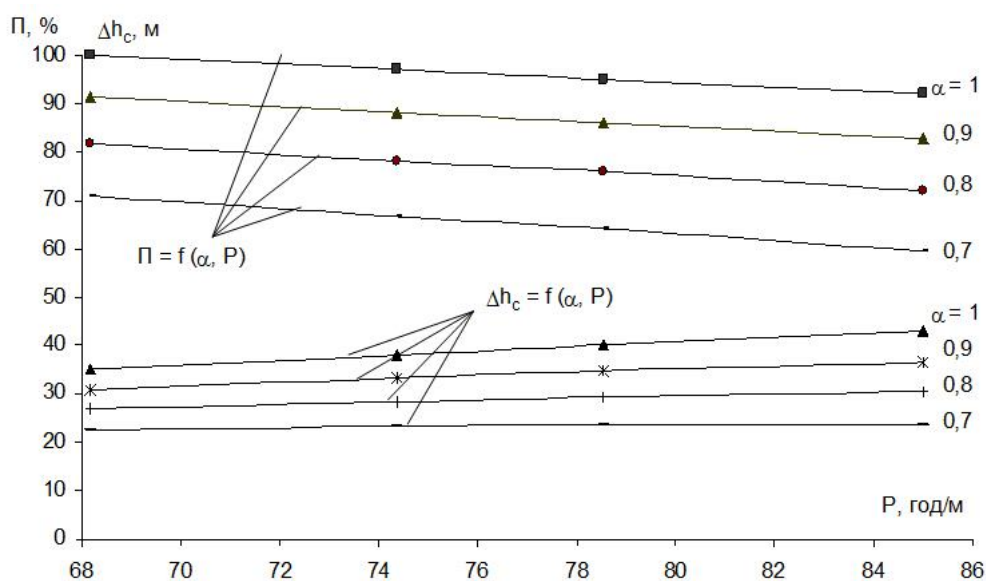


Рис.14. Графіки залежності подачі води із свердловини  $\Pi, \%$ , і зниження рівня води в ній  $\Delta h_c, \text{м}$ , від параметрів  $\alpha$  і  $P$

Опираючись на дослідження роботи заглибних відцентрових насосів, проведених д.т.н., проф. Тугаєм А.М. та д.т.н., проф. Прокопчуком І.Т., нами встановлені значення поправочних коефіцієнтів  $\Delta H_\phi$  і  $\Delta S_\phi$  до гідравлічних характеристик  $Q-H$  насосів, які характеризують інтенсивність зміни за період експлуатації параметрів  $H_\phi$  і  $S_\phi$ , що визначаються за формулами (4) і (5). Встановлено, що у всіх спрацьованих насосів параметр  $H_\phi$  зменшується, а параметр  $S_\phi$ , який характеризує інтенсивність падіння напору насоса при збільшенні його продуктивності, залишається майже без змін. Таким чином, для випадків, коли  $S_\phi \approx const$ , подачу  $Q$ , л/с, і напір  $H$ , м, спрацьованим артезіанським насосом, знаючи термін його експлуатації, можна визначити за формулами

$$Q = \frac{-1/q + \sqrt{(1/q)^2 + 4(H_\phi - H_r - \Delta H_\phi t)\Sigma S}}{2\Sigma S}; \quad (33)$$

$$H = H_\phi - \Delta H_\phi t - S_\phi Q^2. \quad (34)$$

Як показали дослідження, більшу інтенсивність падіння під час експлуатації має подача насоса (рис.15).

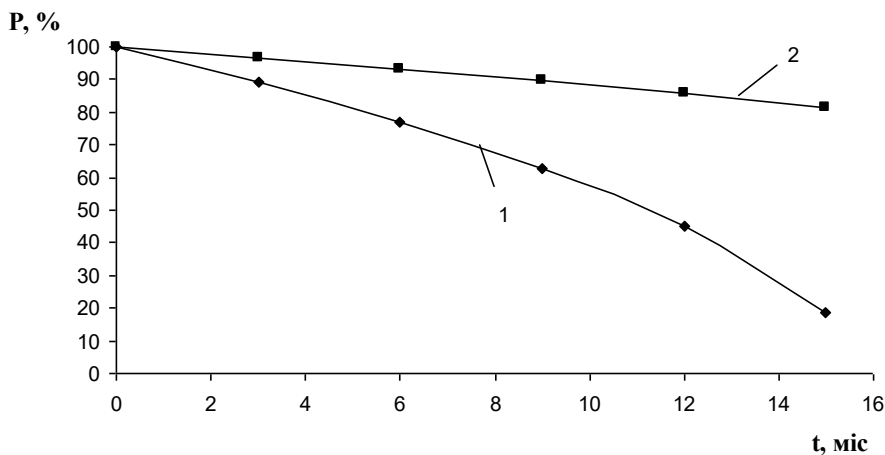


Рис. 15. Графіки зміни протягом часу експлуатації подачі (1) і напору (2) насоса типу ЭЦВ 10-63-110 в % від його початкових значень

Знаючи величину мінімальної подачі води із свердловини  $Q_{\min}$  для забезпечення енергоощадної роботи системи, максимальну тривалість експлуатації насоса можна встановити за формулою

$$t_{\max} = \frac{1}{\Delta H_\phi} \left( H_\phi - H_r + \frac{1/q^2 - (2Q_{\min}\Sigma S + 1/q)^2}{4\Sigma S} \right). \quad (35)$$

При розрахунках водопровідних систем необхідно враховувати і зміни гідравлічних опорів водопровідних труб при їх експлуатації. Для цього доцільно використовувати залежності з визначення гідравлічного похилу в трубах через певний термін, запропоновані д.т.н., проф. Ткачуком О.А. Результати досліджень зміни коефіцієнтів збільшення гідравлічних опорів  $k_s$  для незахищених металевих труб різних діаметрів  $d_p$  при середніх умовах і різних строках їх експлуатації  $T$  наведено на рис.16. Найінтенсивніше цей коефіцієнт зростає у перші 5 років експлуатації трубопроводів.

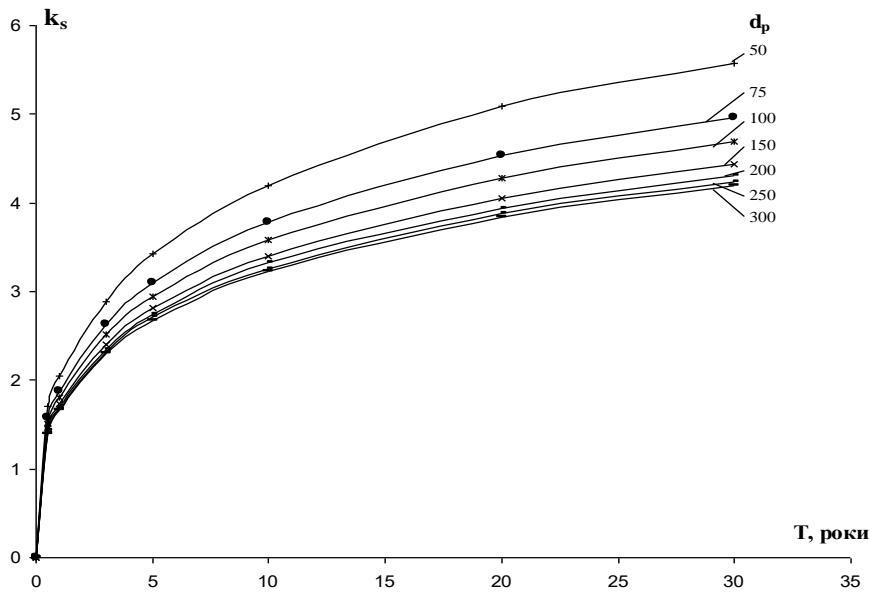


Рис.16. Графіки залежності  $k_s = f(T; d_p)$  для незахищених металевих трубопроводів при середніх умовах їх експлуатації

**Четвертий розділ** присвячено розробці заходів ресурсозбереження при заборі води з підземних джерел. Досліджено проблеми, які часто виникають при заборі води із залізовміщуючих пластів, пов'язані із швидким зростанням гідравлічного опору фільтрів свердловин і прифільтрових зон, що призводить до зменшення подачі води та збільшення її собівартості. Причиною цього в протифільтраційних завісах є застосування ерліфтного способу водовідбору з дренажних свердловин, при якому відбувається контакт кисню повітря з розчиненим у воді  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$  з утворенням малорозчинного осаду  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , що кольматує бокову поверхню фільтра. Застосування сифонної системи водовідбору при будівництві нових протифільтраційних завіс та удосконалених конструкцій фільтрів при переобладнанні діючих вертикальних дренажів дають змогу значно збільшити тривалість ефективної експлуатації таких свердловин.

Для господарсько-питних потреб при заборі води з підвищеним вмістом заліза доцільно застосовувати технології знезалізнення підземних вод на основі спрощеної аерації і фільтрування через волокнисте та легке плаваюче завантаження, які реалізовані в нових конструкціях установок, що захищені патентами та впроваджені у нормативні документи і виробничу практику. Вони дозволяють порівняно з типовими проектами зменшити питомі витрати станцій водопідготовки: капітальні на 30-40%; експлуатаційні на 20-30%.

У зв'язку з посиленням вимог до якості питної води в нових нормативах посилились і вимоги до ефективності роботи водознезалізнювальних установок. Експериментальними дослідженнями встановлено розрахункові тривалості роботи фільтра при різних швидкостях фільтрування та значення питомих брудомісткостей, що забезпечують нормативну якість фільтрованої води. Автором запропоновано емпіричні формули для визначення мінімальної та максимальної питомих брудомісткостей,  $G_{\text{п}}$ ,  $\text{кг/м}^2$ , які дійсні при швидкостях фільтрування  $V_{\text{ф}}$ , в межах 7-11 м/год та вмісті заліза у вихідній воді  $C_{\text{в}} > 0,2$   $\text{мг/дм}^3$ :

$$G_{п. \min} = 0,357 C_B [0,36 + 0,195(V_\phi - 7)]; \quad (36)$$

$$G_{п. \max} = 0,00182 V_\phi C_B [96 - 5,5(V_\phi - 7)]. \quad (37)$$

Внаслідок спрацювання у процесі експлуатації заглибних електронасосів змінюються їхні як гідравлічні ( $Q-H$ ), так і енергетичні ( $Q-N$ ) та ( $Q-\eta$ ) характеристики, що призводить до зменшення подачі води із свердловин та збільшення питомих витрат електроенергії на відкачування води (рис.17).

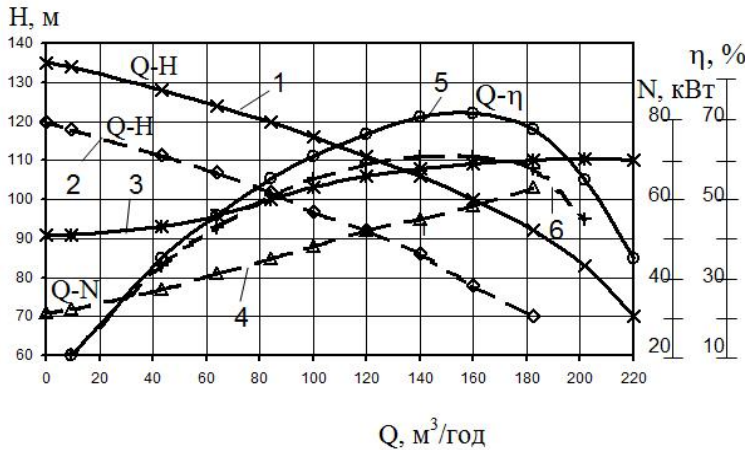


Рис. 17. Характеристики нового (суцільними лініями) і спрацьованого після 11 місяців експлуатації (пунктирними лініями) насоса ЭЦВ 12-160-100: 1 і 2 – гідравлічна  $Q-H$ ; 3 і 4 – енергетична  $Q-N$ ; 5 і 6 – енергетична  $Q-\eta$

Нами запропоновано залежності, що дозволяють визначати розрахункові показники роботи і граничні умови заміни старого насосного обладнання новим. Мінімальна подача насоса,  $m^3/год$ , наприкінці його роботи та максимальний строк, міс, експлуатації старого насоса, після якого економічно вигідним стає заміна його новим насосом:

$$Q_{\min} = 0,5 \left( Q_H + \sqrt{Q_H^2 - 4E_\phi} \right); \quad (38)$$

$$t_{\max} = 0,5 \left( Q_H - \sqrt{Q_H^2 - 4E_\phi} \right) / \Delta Q, \quad (39)$$

де  $Q_H$  – подача нового насоса,  $m^3/год$ ;  $\Delta Q$  – інтенсивність зниження подачі води насосом із свердловини протягом місяця,  $m^3/(год \cdot міс)$ ;  $E_\phi$  – економічний фактор,  $(m^3/год)^2$ , що характеризує капітальні та експлуатаційні витрати насосного обладнання свердловини:

$$E_\phi = \frac{\Delta Q (K_{н.н} - K_{с.н} + C_M)}{720 \sigma \Delta N_\Pi}. \quad (40)$$

$K_{н.н}$  і  $K_{с.н}$  – вартість, відповідно, нового і старого насосного обладнання, грн.;  $C_M$  – вартість монтажних, демонтажних і пусканалагоджувальних робіт, грн.;  $\sigma$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, грн./кВт·год;  $\Delta N_\Pi$  – щомісячне збільшення питомих витрат енергії внаслідок спрацювання насоса, кВт·год/ $(m^3 \cdot міс.)$ .

Граничні умови заміни старого насосного обладнання свердловини новим:

$$E_{\phi, \max} = \frac{\Delta Q (K_{н.н} - K_{с.н} + C_M)}{720 \sigma \Delta N_\Pi} \leq (0,5 Q_H)^2; \quad Q_{\min} \geq 0,5 Q_H; \quad t_{\max} \leq 0,5 Q_H / \Delta Q. \quad (41)$$

При глибині до динамічного рівня не більше 10 м для відкачування води із свердловин або шахтних колодязів доцільно застосовувати сифонні водозабори, у яких перекачування води здійснюється горизонтальними відцентровими насосами, що мають більший ккд, ніж у заглибних відцентрових насосів, і які характеризуються значно більшою тривалістю стабільної і безперебійної роботи. Запропоновано методику розрахунку таких систем, що здійснюється шляхом ітераційних обчислень з використанням встановлених раніше залежностей для визначення подачі води з кожної свердловини та зниження рівнів води в них, а також розрахункового напору в системі.

У п'ятому розділі розглянуто питання удосконалення методів розрахунку СПРВ. Для визначення регулюючого об'єму води в напірних резервуарах, м<sup>3</sup>, у ДБН В.2.5-74:2013 рекомендовано формулу

$$W_p = Q_{\text{доб}} (1 - K_n + (K_r - 1)(K_n/K_r)^{K_r/(K_r - 1)}), \quad (42)$$

де  $Q_{\text{доб}}$  – витрата води за добу максимального водоспоживання, м<sup>3</sup>/добу;  $K_n$  і  $K_r$  – максимальні коефіцієнти погодинної нерівномірності, відповідно, подачі води насосами і водоспоживання.

Відомо, що найточніше регулюючий об'єм води, м<sup>3</sup>, визначається при суміщенні графіків надходження води у резервуар і водовідбору з нього:

$$W_p = Q_{\text{доб}} P_{\text{max}} / 100, \quad (43)$$

де  $P_{\text{max}}$  – величина потрібного регулюючого об'єму в % від  $Q_{\text{доб}}$

$$P_{\text{max}} = \alpha_{\text{max}} + |\alpha_{\text{min}}|, \quad \%, \quad (44)$$

$\alpha_{\text{max}}$  і  $\alpha_{\text{min}}$  – максимальні ординати між інтегральними лініями подачі води насосами в резервуар і відбирання води, відповідно, по надлишку і недостатці.

Тоді при  $K_n = 1$  формулу (42) можна записати

$$P_{\text{max}} = 100 \cdot (K_r - 1) (1/K_r)^{K_r/(K_r - 1)}, \quad \%. \quad (45)$$

Перевірка точності цієї формули при  $K_r$  в межах від 1,7 до 3,0 шляхом порівняння отриманих значень з результатами визначення величини  $P_{\text{max}}$  за формулою (44) виявила значні розбіжності (рис.18), коли похибка може перевищувати 30%. Тому нами запропоновано емпіричну залежність, що дозволяє при  $K_r = 1,7-3,0$  точніше визначати регулюючий об'єм резервуарів:

$$P_{\text{max}} = 449,96 - 36,416 K_r^3 + 256,11 K_r^2 - 581,13 K_r. \quad (46)$$

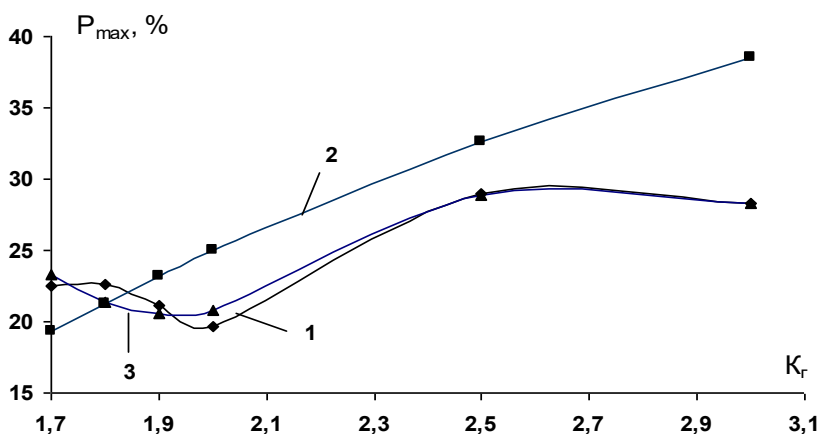


Рис. 18. Графіки залежності  $P_{\text{max}} = f(K_r)$  при  $K_n = 1$ , побудовані з використанням формул:  
1 – ф.(44);  
2 – ф.(45);  
3 – ф.(46)



В системах водопостачання при подачі води з РЧВ безпосередньо в башту напір, м, і подача, л/с, насоса:

$$H_H = H_\phi - S_\phi Q^2 = H_\Gamma + h_K + h_B, \quad (47)$$

$$Q_H = \sqrt{\frac{H_\phi - H_\Gamma}{S_K + S_B + S_\phi}}, \quad (48)$$

де  $h_K$  і  $h_B$  – втрати напору, м, відповідно, в комунікаціях насосної станції і водоводі.

Якщо ж між РЧВ і баштою у вузлі 1 здійснюється фіксований відбір води витратою  $Q_1$ , то розрахунок залежить від напрямку руху води у дану ( $i$ -ту) годину – в башту чи з неї:

$$H_{H,i} = H_{\Gamma,i} + Q_{H,i}^2 (S_K + S_B) + S'_B (Q_{H,i} - Q_{1,i})^2; \quad (49)$$

$$Q_{H,i} = \frac{Q_{1,i} S'_B + \sqrt{(Q_{1,i} S'_B)^2 + (H_\phi - H_{\Gamma,i} - S'_B Q_{1,i}^2)(S_\phi + S_K + S_B + S'_B)}}{S_\phi + S_K + S_B + S'_B}, \quad (50)$$

де  $S_B$  і  $S'_B$  – гідравлічний опір водоводу на ділянці, відповідно, від насосної станції до вузла 1 та від вузла 1 до башти. Знак для  $S'_B$  приймається тотожним знаку різниці витрат води  $Q_{H,i} - Q_{1,i}$ .

Протягом доби величина  $H_\Gamma$  буде змінюватися внаслідок коливань рівнів води в резервуарах, тому фактичний графік подачі води насосом буде відрізнятися від наміченого (рис.19). Оскільки в рівняннях (49) і (50) кілька невідомих, то розрахунки здійснюють шляхом ітерацій, приймаючи на початку обчислень для першої години доби середні значення подачі насоса та геометричної висоти водопідйому. Розрахунок ведуть до виконання вимог рівності добового водоспоживання і подачі насоса, що досягається за умови рівності значень  $H_\Gamma$  на початок даної і наступної доби.

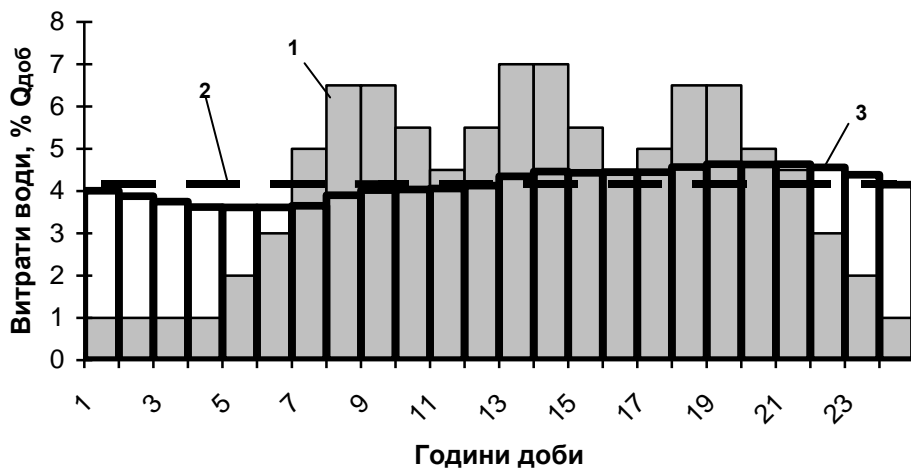


Рис. 19. Суміщений графік водоспоживання і подачі води насосами:  
1 – графік водоспоживання; 2 – намічений графік роботи насоса; 3 – фактичний графік подачі води насосом протягом доби

Подачу води насосом у водопровідну мережу з контррезервуаром, л/с, можна визначити, знаючи коефіцієнт зменшення втрат напору у мережі внаслідок відбору води по шляху її транспортування  $\alpha_i$ :

$$Q_{н.і} = \sqrt{\frac{H_{\phi} - H_{г.і}}{S_{\phi} + S_{к} + S_{в} + \alpha_i S_{м}}}, \quad (51)$$

де  $S_{м}$  – гідравлічний опір водопровідної мережі, (с/л)<sup>2</sup>м.

У дослідженнях проф. В.Г.Ільїна баштових систем показано, що для аналізу сумісної роботи споруд з достатньою для практичних цілей точністю залежність коефіцієнта  $\alpha_i$  від величини співвідношення значень водоспоживання і подачі насоса ( $Q_{м.і}/Q_{н.і}$ ) можна апроксимувати рівнянням

$$\alpha_i = 1 - P (Q_{м.і}/Q_{н.і})^2, \quad (52)$$

у якому параметр  $P$  визначають за формулою

$$P = \frac{h_{м.2} Q_{н.1}^2 - h_{м.1} Q_{н.2}^2}{h_{м.2} Q_{м.1}^2 - h_{м.1} Q_{м.2}^2}, \quad (53)$$

де  $h_{м.1}$  і  $h_{м.2}$  – алгебраїчна сума втрат напору в мережі від точки підключення водоводу до мережі і до водонапірної башти, м, при споживанні з мережі витрат води, відповідно,  $Q_{м.1}$  і  $Q_{м.2}$  та подачі води насосами, відповідно,  $Q_{н.1}$  і  $Q_{н.2}$ .

Гідравлічний опір водопровідної мережі в таких системах:

$$S_{м} = \frac{h_{м.1}}{Q_{н.1}^2 - P Q_{м.1}^2} = \frac{h_{м.2}}{Q_{н.2}^2 - P Q_{м.2}^2}. \quad (54)$$

Враховуючи залежності (52)-(54), отримано формулу, що дозволяє визначати подачу насоса протягом доби, л/с, шляхом виконання гідравлічного розрахунку мережі лише на два розрахункові випадки: при  $Q_{м.2}/Q_{н.2} > 1$  (наприклад, при максимальному водовідборі) та при  $Q_{м.1}/Q_{н.1} < 1$  (наприклад, при максимальному транзиті води в башту), що значно спрощує обчислення

$$Q_{н.і} = \sqrt{\frac{H_{\phi} - H_{г.і} + P Q_{м.і}^2 S_{м}}{S_{\phi} + S_{к} + S_{в} + S_{м}}}. \quad (55)$$

При порівнянні отриманих результатів розрахунків за формулами (50) і (55) виявилось, що максимальна похибка в обчисленнях подачі насоса  $Q_{н.і}$  за формулою (55) не перевищує 3 %, однак, порівнюючи інші параметри роботи системи за цими двома методами, виявилось розходження у значеннях  $H_{г.і}$  а тому формулу (55) рекомендується використовувати лише для наближених обчислень.

**Шостий розділ** присвячено вирішенню питань забезпечення енергоощадних режимів сумісної роботи водопровідних споруд в СПРВ. Отримали подальший розвиток наукові дослідження, в яких енергетичну характеристику  $N = f(Q)$  запропоновано апроксимувати рівнянням виду

$$N = A + BQ^{\alpha}, \quad (56)$$

де значення параметрів  $A$ ,  $B$  і  $\alpha$  обчислюють методом найменших квадратів.

Це дозволяє визначати економічні режими роботи насосів при зміні водоспоживання, виходячи із вимог забезпечення споживачів розрахунковими витратами води під необхідними вільними напорами при найменших витратах електроенергії. Нами встановлені параметри гідравлічної ( $H_\phi$  і  $S_\phi$ ) та енергетичної ( $A$ ,  $B$  і  $\alpha$ ) характеристик найбільш поширених в Україні відцентрових насосів, які наведені в додатках.

Щоб забезпечити роботу насосів у зоні максимального ккд здійснюють регулювання шляхом обточення робочих коліс та зміною частоти їх обертання, що дозволяє значно зменшити подачу, напір і споживану потужність при зміні водоспоживання. Необхідні параметри визначають за формулами

$$n_{\text{рег}} = n_{\text{к}} \sqrt{\frac{H_\phi - \Delta H}{H_\phi}}; \quad D_{\text{об}} = D_{\text{к}} \sqrt{\frac{H_\phi - \Delta H}{H_\phi}}, \quad (57)$$

де  $n_{\text{к}}$  і  $D_{\text{к}}$  – частота обертання і діаметр робочого колеса насоса за каталогом;  $n_{\text{рег}}$  і  $D_{\text{об}}$  – те саме, при його регулюванні;  $\Delta H = H_{\text{н}} - H_{\text{рег}}$  – надлишок напору, створюваного підібраним насосом.

Споживана на валу регульованого насоса потужність:

$$N_{\text{рег}} = A_{\text{рег}} + B_{\text{рег}} Q_{\text{рег}}^\alpha. \quad (58)$$

При паралельній роботі групи із  $m$  однотипних насосів загальну характеристику будують по залежностям:  $H_{\text{гр}} = H_1$ ;  $Q_{\text{гр}} = mQ_1$ ;  $N_{\text{гр}} = mN_1$ , де індексами 1 і гр, відповідно, позначено показники роботи одного насоса та групи. Параметри характеристик при паралельній роботі однотипних насосів:

$$H_{\phi, \text{гр}} = H_{\phi, 1}; \quad S_{\phi, \text{гр}} = \frac{S_{\phi, 1}}{m^2}; \quad A_{\text{гр}} = mA_1; \quad B_{\text{гр}} = m^{1-\alpha} B_1; \quad \alpha_{\text{гр}} = \alpha_1. \quad (59)$$

Напір та споживана потужність групи із  $m$  нерегульованих насосів:

$$H_{\text{гр}, i} = H_\phi - S_\phi (Q_{\text{м}, i} / m)^2; \quad N_{\text{гр}, i} = mA + m^{1-\alpha} B Q_{\text{м}, i}^\alpha. \quad (60)$$

Для випадку, коли із  $m$  одночасно працюючих однакових насосів  $c$  регулюється зміною частоти обертання робочих коліс, то подачу, л/с, і частоту обертів, об./хв, одного регульованого насоса розраховують за формулами

$$Q_{\text{р}, i} = \frac{Q_{\text{м}, i} - (m-c)Q_{\text{н}, i}}{c}; \quad n_{\text{рег}, i} = n_{\text{к}} \sqrt{\frac{H_{\text{н}, i} + S_\phi Q_{\text{р}, i}^2}{H_\phi}} \quad (61)$$

де  $Q_{\text{м}, i}$  – водоспоживання в мережі в дану ( $i$ -ту) годину доби, л/с;  $Q_{\text{н}, i}$  – подача одного нерегульованого насоса, л/с;  $H_{\text{н}, i}$  – потрібний напір насоса, м.

Загальна споживана потужність усіх працюючих у дану годину насосів:

$$N_{\text{гр}, i} = (m-c)(A + BQ_{\text{н}, i}^\alpha) + c(A_{\text{рег}} + B_{\text{рег}} Q_{\text{р}, i}^\alpha). \quad (62)$$

Використовуючи наведені залежності, можна аналізувати роботу системи водопостачання за різними схемами і варіантами роботи споруд та вибирати економічні режими експлуатації насосів при зміні водоспоживання.

При дослідженнях сумісної роботи споруд в автоматизованих водопровідних системах з водонапірною баштою встановлено, що максимальна кількість включень насоса за годину  $n_{\text{мак}}$  буде у випадку, коли водоспоживання

в мережі буде становити половину від максимального годинного водоспоживання і, відповідно, половину від середньої подачі насоса:  $Q_{м.і} = 0,5 Q_{м.маx} = 0,5 Q_{н.ср}$ . Виходячи з цього, отримано залежності для визначення потрібного об'єму бака башти та встановлено максимальну кількість включень насоса за годину  $n_{маx}$  для різних коефіцієнтів  $K_г$ .

У результаті досліджень сумісної роботи споруд безбаштової системи при живленні мережі з різних боків від кількох насосних станцій запропоновано метод розрахунку, що дозволяє шляхом ітераційних обчислень і аналізу отриманих результатів здійснювати перерозподіл навантаження між насосними станціями для забезпечення енергоощадної роботи системи водопостачання.

Дослідженнями сумісної роботи насоса і трубопровідної системи в безбаштовій водопровідній мережі (рис. 20) встановлено залежності для визначення енергетичних показників при різних варіантах регулювання насоса.

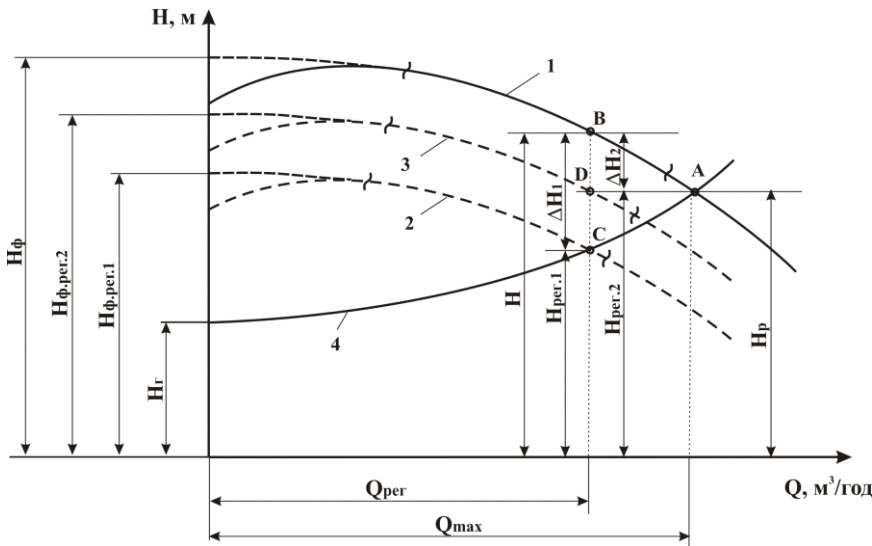


Рис.20. Графіки сумісної роботи споруд при різних варіантах регулювання насосів: 1 – характеристика  $Q-H$  нерегульованого насоса; 2 – те ж, регульованого насоса; 3 – те ж, регульованого насоса при  $H_p = const$ ; 4 – трубопровідної системи

При відомому значенні подачі величиною  $Q_{рег}$ , що дорівнює водоспоживанню з мережі, споживану на валу регульованого насоса потужність, кВт, можна визначити за формулою

$$N_{пер} = N \left( \frac{n_{пер}}{n} \right)^2 = N \left( \frac{H_{ф} - \Delta H}{H_{ф}} \right). \quad (63)$$

На насосних станціях регулювання насосів можна здійснювати, приймаючи постійним значення розрахункового напору ( $H_p = const$ ), визначеного для  $Q_{маx}$ . У цьому випадку при подачі  $Q_{рег}$  і напорі  $H_p = H_{пер.2}$  характеристика насоса (рис.20) займе положення 3, робочою буде точка D, надлишковий напір знизиться на величину  $\Delta H_2$ , а споживана на валу насоса потужність, кВт, визначатиметься як

$$N_{пер} = N \left( \frac{n_{пер}}{n} \right) = N \sqrt{\frac{H_{ф} - \Delta H}{H_{ф}}}. \quad (64)$$

Досліджено роботу водопровідних систем з різнотипними насосами, які часто застосовують на насосних станціях в умовах значного коливання обсягів

водоспоживання. У такій схемі при регулюванні лише одного насоса можуть виникати кавітаційні процеси, підвищуються навантаження на підшипники і вали насосів і зрештою знижується енергоефективність. Тому рекомендується передбачати частотне регулювання для всієї групи встановлених насосів, а підбір режимів їх роботи здійснювати з використанням розробленого методу, що забезпечить подачу кожного насоса в його робочому діапазоні та сприятиме нормальному функціонуванню агрегатів з високими показниками ккд.

На основі узагальнення результатів всіх проведених вище наукових досліджень запропоновано структуру узагальненої імітаційної моделі роботи водопровідної системи, логіко-математичне наповнення якої включає визначення гідравлічних та енергетичних показників, враховуючи зміни характеристик споруд у процесі експлуатації, з наступним розрахунком питомих витрат електроенергії на подачу води (рис.21). Рівняння, що описують імітаційну модель роботи системи водопостачання, у кожному окремому випадку залежать від конкретної схеми і умов експлуатації споруд.



Рис.21. Структура узагальненої імітаційної моделі роботи водопровідної системи

Це дало змогу розробити метод імітаційного моделювання сумісної роботи взаємодіючих водопровідних споруд системи водопостачання, де застосовується методологія системного аналізу, що дозволяє експериментувати на комп'ютері, не вдаючись до експериментів на реальному об'єкті, і використовувати отримані результати в цілях проектування, аналізу та оцінки функціонування системи. При дослідженнях будь-яких систем водопостачання імітаційне моделювання дає змогу аналізувати отримані результати розрахунків питомих витрат електроенергії за різними варіантами водоподачі та визначати склад і режими експлуатації споруд з найнижчим енергоспоживанням при дотриманні умов забезпечення розрахункових витрат і напорів води в системі.

У цьому розділі наведено результати апробації теоретичних наукових досліджень на діючих системах водопостачання, які підтвердили, що характеристики споруд протягом часу експлуатації змінюються, що призводить до зниження ефективності їхньої роботи та збільшення питомих витрат електроенергії. Крім того, з часом можуть змінитися обсяги і режими водоспоживання, конфігурація мережі, вузлові відбори тощо. При розрахунках таких систем методом імітаційного моделювання важливо мати точні вихідні дані, які отримують шляхом натурних випробувань і досліджень, що дає змогу встановити фактичну картину роботи гідравлічно взаємодіючих споруд та приймати науково обґрунтовані рішення щодо реконструкції діючої СПРВ чи вибору економічно доцільних режимів її експлуатації.

Наукові розробки апробовані і впроваджені на КП "Чернігівводоканал", де експлуатується водопровідна система з водозабірними свердловинами, розташованими на 4 майданчиках ВНС у різних кінцях міста. Заглибними відцентровими насосами вода, що забирається з різних водоносних пластів, збірними водоводами подається в резервуари. Максимальна продуктивність існуючих водозабірних споруд значно перевищує показники водоспоживання.

Для забезпечення енергоощадного водопостачання в таких системах доцільно, використовуючи імітаційне моделювання, проаналізувати отримані результати досліджень за різними можливими варіантами експлуатації свердловин при сумарній подачі ними розрахункових витрат води та встановити режими роботи споруд з найнижчим енергоспоживанням.

Дослідження проводили шляхом ітераційних обчислень за блок-схемою рис.22. Подачу води, л/с, із кожної свердловини визначали за формулою

$$Q_i = P_i \left[ \frac{-1/q_i + \sqrt{(1/q_i)^2 + 4(H_{\phi.i} - H_{\Gamma.i} - \Sigma h_i)(S_{\kappa.i} + S_{\text{в.і}} + S_{\phi.i})}}{2(S_{\kappa.i} + S_{\text{в.і}} + S_{\phi.i})} \right], \quad (65)$$

де  $P_i$  – параметр, який вказує на те, чи працює ця свердловина ( $P = 1$ ) у даний час в розрахунковій системі водопостачання, чи вона відключена ( $P = 0$ );  $\Sigma h_i$  – сума втрат напору на спільних ділянках водоводу, по яким подається вода як із даної свердловини, так і від інших свердловин даної групи, м.

Питома витрата електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>, на подачу 1 м<sup>3</sup> води:

$$E_i = \frac{N_i}{Q_i} \quad (66)$$

де  $N_i$  – споживана на валу насоса потужність, кВт;  $Q_i$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/год.

Середня питома витрата електроенергії, кВт·год/м<sup>3</sup>, усіма свердловинами:

$$E_{\text{ср}} = \frac{\Sigma N_i}{\Sigma Q_i}. \quad (67)$$

Дослідження, проведені на КП "Чернігівводоканал", дали змогу встановити на кожному майданчику економічно доцільний варіант роботи системи, що дозволяє в цілому зменшити споживання електроенергії на 609 тис. кВт·год/рік та заощадити значні кошти експлуатаційних витрат.

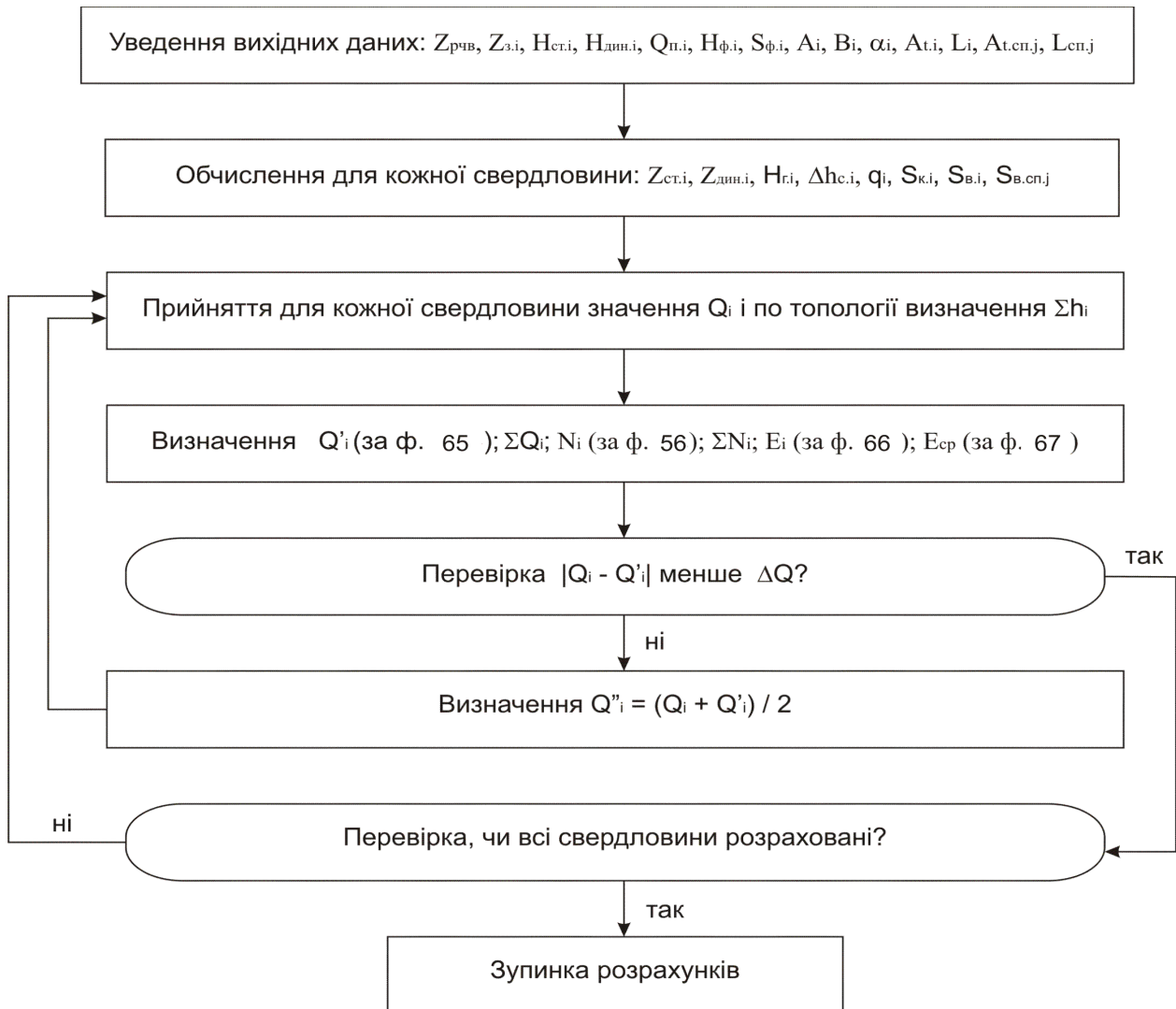


Рис. 22. Блок-схема виконання розрахунків показників роботи свердловин

Користуючись розробленим методом імітаційного моделювання сумісної роботи взаємодіючих водопровідних споруд, можна аналізувати роботу системи з урахуванням різних факторів, наприклад, враховуючи різну якість води в різних водоносних пластах та різні схеми подачі води в РЧВ, різну вартість електроенергії у денні і нічні години при запровадженні багатозонних тарифів тощо. Це дає змогу економічно обґрунтувати склад, розміри і режими експлуатації споруд при реконструкції системи водопостачання.

Використовуючи запропоновані методи розрахунку, досліджували роботу насосних станцій 2-го підняття міста Чернігова за різними варіантами експлуатації насосних агрегатів при зміні водоспоживання. Встановлено режими, які забезпечують мінімальні питомі витрати електроенергії на подачу води при роботі регульованих або нерегульованих насосів. Дослідження показали, що регулювання насосів дозволяє знизити енергоспоживання в середньому на 27-29% та зекономити 694 тис.кВт·год/рік електроенергії, що підтверджується показниками роботи водопровідної системи в реальних умовах.

Науково-методичні розробки та результати досліджень передані комунальним підприємствам "Бердичівводоканал" та "Обухівводоканал" для поліпшення роботи систем водопостачання цих міст, керуючись принципами енергозбереження, з метою зниження експлуатаційних витрат за споживану електроенергію, які є головною складовою у собівартості води.

У додатках наведено інформаційні дані про розподіл, запаси, видобуток і використання підземних вод в Україні; параметри робочих характеристик насосів; розрахунок окремих елементів, споруд і систем водопостачання; приклад імітаційного моделювання при дослідженнях сумісної роботи споруд з урахуванням різних факторів; впровадження результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

1. У результаті виконаних наукових досліджень розроблено, теоретично обґрунтовано і підтверджено на практиці методи енергоощадного водопостачання з підземних джерел, які у сукупності вирішують важливу наукову і народногосподарську проблему – забезпечення населення якісною питною водою при мінімізації питомих витрат електроенергії на подачу води. Результати досліджень включені в нормативні документи з проблем ресурсозбереження при проектуванні нових та реконструкції діючих систем водопостачання, а також впроваджені у практику експлуатації.

2. Запропоновано структуру узагальненої імітаційної моделі роботи водопровідної системи, логіко-математичне наповнення якої залежить від конкретної схеми та умов експлуатації, включає залежності для розрахунку гідравлічних і енергетичних показників роботи споруд з урахуванням зміни їхніх характеристик у часі та встановлення величини питомого енергоспоживання при подачі розрахункових витрат води.

3. Розроблено метод імітаційного моделювання систем водопостачання, що дозволяє аналізувати отримані результати розрахунків сумісної роботи споруд за різними варіантами водоподачі та визначати склад і експлуатаційні режими роботи системи з найменшим енергоспоживанням при забезпеченні споживачів розрахунковими витратами і напорами води в умовах можливої зміни величини водоспоживання та характеристик споруд.

4. Досліджено сумісну роботу водопровідних споруд при заборі води з напірних та безнапірних водоносних пластів, отримано залежності, що дають змогу визначати подачу води як з окремої свердловини, так і з усієї групи взаємодіючих свердловин. Розроблено метод розрахунку водопровідної системи з водозабірними свердловинами, що дозволяє встановити їх доцільний склад і режими експлуатації при забезпеченні розрахункових витрат води.

5. Встановлено закономірності зміни показників роботи системи водопостачання у процесі експлуатації внаслідок збільшення гідравлічних опорів руху води у фільтрі і прифільтровій зоні свердловини, комунікаціях і водоводах та зміни гідравлічної характеристики заглибного відцентрового



насоса. Встановлено, що найбільший вплив на зменшення подачі води із свердловини має зменшення напору насоса внаслідок спрацювання його деталей. Розроблено метод розрахунку подачі води із свердловин при сумісній дії всіх факторів впливу та визначення максимальної тривалості експлуатації насосів для забезпечення енергоощадної роботи системи водопостачання.

6. Досліджено роботу сучасних автоматизованих водопровідних систем з гідропневматичними установками, отримано залежності для визначення розрахункових об'ємів бака, максимальних і мінімальних значень зниження рівнів води та подач насосів для вибору економічного режиму їх експлуатації.

7. Обґрунтовано заходи з інтенсифікації процесів очищення підземних вод, що реалізовані в нових технологічних рішеннях та конструкціях установок, захищених патентами та впроваджених у нормативні документи, які забезпечують високу ефективність видалення з води заліза при зменшенні капітальних (на 30-40%) та експлуатаційних (на 20-30%) витрат порівняно з типовими проектами. Підтверджено доцільність застосування удосконалених конструкцій фільтрів свердловин при заборі води із залізозмішаних пластів, що дозволяє значно збільшити тривалість ефективної експлуатації системи.

8. Обґрунтовано залежність для визначення регулюючих об'ємів води в резервуарах локальних водопроводів, яка дозволяє більш точно розраховувати регулюючий об'єм бака водонапірної башти. Проаналізовано та удосконалено методи розрахунку сумісної роботи споруд системи подачі і розподілу води за різними схемами живлення водопровідної мережі з водонапірною баштою, безбаштових систем водопостачання та систем з подачею води в мережу від кількох насосних станцій, що передбачає здійснення перерозподілу навантаження між ними для забезпечення енергоощадної роботи системи.

9. Досліджено способи визначення енергетичних показників роботи одиночних насосів та групи агрегатів в схемах з паралельною експлуатацією однотипних чи різнотипних насосів. Отримано залежності для розрахунку параметрів роботи регульованих насосів при різних схемах та методах регулювання, що дозволяє досягнути мінімізації енерговитрат при зміні водоспоживання.

10. Результати дисертаційних досліджень передані комунальним підприємствам міст Чернігів, Бердичів Житомирської області та Обухів Київської області для поліпшення роботи діючих систем водопостачання з підземних джерел з метою зниження енергоспоживання. Впровадження дисертаційних розробок на КП "Чернігівводоканал" показало, що застосування рекомендованих енергоощадних режимів роботи системи з водозабірними свердловинами дає змогу зменшити споживання електроенергії на 609 тис.кВт·год/рік, а використання частотного регулювання електродвигунів насосів, що живлять водопровідну мережу міста, дозволяє знизити енергоспоживання на 27-29% та заощадити значні кошти експлуатаційних витрат.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Монографії*

1. Хомуцька Т.П. Енергоощадне водопостачання / Т.П. Хомуцька. – К: Аграрна наука, 2016. – 304 с.

2. Хоружий П.Д. Ресурсозберігаючі технології водопостачання / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомуцька, В.П. Хоружий. – К: Аграрна наука, 2008. – 534с.

*Особистий внесок здобувача полягає в підготовці трьох розділів монографії за темою дисертації.*

### *Статті в іноземних періодичних виданнях*

3. Mosiichuk Y.B. Structures with adjustable and unregulated pumps in the water supply without tower / Y.B. Mosiichuk, T.P.Khomutetska // Environmental engineering – through a young eye. Volume 29, Białystok, 2016. – P.138-146.

*Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні методів розрахунку роботи насосних станцій в безбаптових системах водопостачання.*

4. Поберезниченко О.Ю. Методика расчета и оптимизации работы систем подачи и распределения воды с водозаборными скважинами / О.Ю. Поберезниченко, Т.П. Хомуцькая // Инженерно-строительный журнал, Санкт-Петербург, 2014, №2(46). – С. 58-64.

*Особистий внесок здобувача полягає в розробці способів розрахунку систем подачі і розподілу води з метою енергозбереження.*

5. Хомуцькая Т.П. Оптимизация работы систем водоснабжения с водозаборными скважинами / Т.П. Хомуцькая // Водоснабжение и канализация, Москва, № 1-2, 2013. – С. 116-120.

6. Хомуцькая Т.П. Определение энергосберегающих режимов работы водозаборных сооружений из подземных источников / Т.П. Хомуцькая // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение, Москва, 2013, № 7. – С. 56-61.

7. Хомуцькая Т.П. Энергосберегающие технологии в системах подачи и распределения воды / Т.П. Хомуцькая // Сб. науч. трудов "Современные энерго- и ресурсосберегающие, экологически устойчивые технологии и системы сельскохозяйственного производства", Рязань, 2013, № 10. – С. 246-252.

### *Статті у фахових виданнях України*

8. Хомуцька Т.П. Визначення оптимальних робочих параметрів заглибних електронасосів при відкачуванні води із свердловин / Т.П. Хомуцька // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. Вип. 58 / під ред. Д.Ф.Гончаренка. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. – С. 155-160.

9. Хомуцька Т.П. Знезалізнення підземних вод біологічним методом на установках з волокнисто-пінополістирольними фільтрами / Т.П. Хомуцька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.14. – К.: КНУБА, 2010. – С. 22-33.

10. Хомуцька Т.П. Методика розрахунку автоматизованих систем подачі води із шахтних колодязів / Т.П. Хомуцька // Меліорація і водне господарство. Вип. 99. – К.: Аграрна наука, 2011. – С. 200-214.

11. Хомуцька Т.П. Методика розрахунку і оптимізації сумісної роботи насосів, водопровідних мереж і напірно-регулюючих резервуарів / Т.П. Хомуцька // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: наук. видання, 2010, Вип.40. – С. 359-369.

12. Хомуцька Т.П. Регулювання і автоматизація відцентрових насосів при їх сумісній роботі з водонапірними спорудами / Т.П. Хомуцька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.15. – К.: КНУБА, 2010. – С. 35-44.

13. Хомуцька Т.П. Дослідження і розрахунок показників роботи свердловин в безнапірних водоносних пластах / Т.П. Хомуцька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.16. – К.: КНУБА, 2011.– С. 41-50.

14. Хомуцька Т.П. Дослідження факторів впливу на подачу води насосами із свердловин в напірних водоносних пластах / Т.П. Хомуцька // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. Вип. 63. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2011. – С. 352-357.

15. Хомуцька Т.П. Методика оптимізації роботи насосних станцій і безбаштової водопровідної мережі (на прикладі Чернігівського водопроводу) / Т.П. Хомуцька // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: наук. видання, 2012, Вип.48. – С. 215-229.

16. Хомуцька Т.П. Методика розрахунку водопровідних систем з гідропневматичними насосними установками / Т.П. Хомуцька // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: наук. видання, 2011, Вип.42. – С. 276-284.

17. Хомуцька Т.П. Дослідження і оптимізація роботи водопровідних систем з водозабірними свердловинами / Т.П. Хомуцька // Меліорація і водне господарство. Вип.100. – К: ІВПіМ НААН, 2013. – С. 185-197.

18. Хомуцька Т.П. Оптимізація роботи водопровідних систем з водозабірними свердловинами / Т.П. Хомуцька // Науковий вісник будівництва: зб. наук. праць. Вип. 71. – Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2013. – С. 361-366.

19. Хомуцька Т.П. Способи енергозбереження у водопостачанні / Т.П. Хомуцька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.24. – К.: КНУБА, 2014. – С. 257-264.

20. Хомуцька Т.П. Шляхи забезпечення ефективної роботи підприємств водопостачання / Т.П. Хомуцька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.25. – К.: КНУБА, 2015. – С. 273-279.

21. Хомуцька Т.П. Методика визначення регульованих об'ємів води в резервуарах локальних сільгоспводопроводів / Т.П. Хомуцька, О.В. Рубан, П.Д. Хоружий, Д.В. Чарний // Меліорація і водне господарство, 2010, Вип. 98. – С. 304-312.

*Особистий внесок здобувача полягає в проведенні порівняльного аналізу результатів розрахунку за різними залежностями для визначення регульованих об'ємів води в резервуарах.*

22. Хомутецька Т.П. Дослідження доцільності застосування багатозонних тарифів на електроенергію у водопостачанні / Т.П. Хомутецька, Г.А. Сизоненко // Меліорація і водне господарство. Вип.101. – К: ІВПіМ НААН, 2014. – С. 112-123.

*Особистий внесок здобувача полягає в запропонованому методі розрахунку водопровідних систем при застосуванні багатозонних тарифів на електроенергію.*

23. Хомутецька Т.П. Енергоощадне водопостачання: проблеми і рішення (на прикладі Чернігівського водопроводу) / Т.П. Хомутецька, Г.А. Сизоненко // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.23. – К.: КНУБА, 2014. – С. 53-59.

*Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні шляхів забезпечення енергоощадного водопостачання у м. Чернігові.*

24. Хомутецька Т.П. Розрахунок повітрявсмоктувальних систем в напірних водознезалізнювальних установках / Т.П. Хомутецька, П.Д. Хоружий, О.В. Рубан // Вода і водоочисні технології. Науково-технічні вісті, № 4(6), 2011 – 1(7), 2012. – С. 36-42.

*Особистий внесок здобувача полягає в запропонованих рекомендаціях з вибору методу знезалізнення води та способу подачі повітря в напірні водоочисні установки.*

25. Хоружий П.Д. Врахування зміни гідравлічних характеристик споруд при розрахунках подачі води із свердловин / П.Д. Хоружий, Т.П. Хомутецька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб. Вип.18. – К.: КНУБА, 2012. – С. 22-29.

*Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні факторів, що впливають на зміну подачі води із водозабірних свердловин у процесі їх експлуатації.*

26. Тугай А.М. Оптимізація роботи систем із взаємодіючими водозабірними свердловинами / А.М. Тугай, Т.П. Хомутецька // Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки: наук-техн. зб., Вип.21. – К.: КНУБА, 2013. – С. 7-13.

*Особистий внесок здобувача полягає в запропонованій методиці аналізування ефективності роботи взаємодіючих споруд при зміні їхніх гідравлічних характеристик.*

27. Тугай А.М. Теоретичні дослідження впливу зміни гідравлічних характеристик свердловини на показники її роботи / А.М. Тугай, Т.П. Хомутецька // Вісник НУВГП: зб. наук. праць, Вип. 3 (51). – Рівне, 2010. – С. 56-63.

*Особистий внесок здобувача полягає в дослідженні зміни дебіту свердловин при заборі води з напірних та безнапірних водоносних пластів.*

### *Статті в інших виданнях*

28. Хомуцька Т.П. Порівняння методів розрахунку сумісної роботи споруд в системах водопостачання / Т.П. Хомуцька // Зб. доповідей Міжнародного Конгресу «ЕТЕВК-15», НДКТИ МГ. – К.: Тов. "Гнозіс". – С. 87-92.

29. Хомуцька Т.П. Оптимізація сумісної роботи споруд в системах з водозабірними свердловинами / Т.П. Хомуцька // Водне господарство України, 2010, №3. – С. 48-52.

30. Хомуцька Т.П. Дослідження впливу різних факторів на подачу води із свердловин в напірних водоносних пластах / Т.П. Хомуцька // Водне господарство України, № 1, 2011. – С. 32-35.

31. Хомуцька Т.П. Енергоощадлива робота водозабірних свердловин / Т.П. Хомуцька // Зб. доповідей Міжнародного Конгресу «ЕТЕВК-11», НДКТИ МГ. – К.: Тов. "Гнозіс". – С. 110-114.

32. Хомуцька Т.П. Розрахунок пневматичних водонапірних установок в системах подачі води із шахтних колодязів / Т.П. Хомуцька // Матеріали конф. "Сучасні проблеми охорони довкілля, рац. використання ресурсів у водному господарстві". – К.: Тов. "Знання" України, 2011. – С. 3-7.

33. Хомуцька Т.П. Розрахунок сумісної роботи взаємодіючих свердловин / Т.П. Хомуцька // Водне господарство України № 4, 2011. – С. 31-34.

34. Хомуцька Т.П. Шляхи енергоощадного водопостачання / Т.П. Хомуцька // Зб. доповідей Міжнар. Конгресу «ЕТЕВК-13». – К.: НДКТИ МГ. – С. 380-382.

35. Хомуцька Т.П. Оптимізація роботи систем водопостачання / Т.П. Хомуцька // Зб. доп. III Міжнар. н.-пр. конф. "Чиста вода. Фундаментальні, прикладні та промислові аспекти", НТУУ "КПІ", 2015. – С. 211-213.

36. Хомуцька Т.П. Оптимізація сумісної роботи водозабірних свердловин, насосів і напірно-регулюючих резервуарів / Т.П. Хомуцька, П.Д. Хоружий, О.В. Рубан // Матер. міжнар. наук.-пр. конф. "Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання ресурсів у водному господарстві". – К.: Тов. "Знання" України, 2010. – С. 13-17.

*Особистий внесок здобувача полягає в розкритті шляхів зниження витрат електроенергії при сумісній роботі водопровідних споруд гідравлічної взаємодії.*

37. Шкінь О.М. Шляхи енергозбереження в системах господарсько-питного водопостачання на прикладі Чернігівського водопроводу / О.М. Шкінь, Т.П. Хомуцька, П.Д. Хоружий // Водне господарство України, № 2 (104), 2013. – С. 18-22.

*Особистий внесок здобувача полягає у виконанні розрахунку роботи системи водопостачання при різних варіантах експлуатації насосної станції та встановленні енергоощадних режимів.*

### ***Патенти на винаходи та корисні моделі***

38. Установа для незалізнення води. Декл. патент на винахід № 59672А. / Хоружий П.Д., Хомуцька Т.П., Хоружий В.П., Чарний Д.В., опубл. 15.09.2003, бюл. № 9.

*Особистий внесок здобувача полягає в конструктивних та технологічних пропозиціях щодо забезпечення промивки фільтра для виключення періоду його зарядки та зменшення витрат води і електроенергії.*

39. Напірна установка для незалізнення води. Декл. патент України на корисну модель № 9088 / Хомуцька Т.П., Хоружий П.Д., Хоружий В.П., опубл. 15.09.2005р., бюл. № 9.

*Особистий внесок здобувача полягає в удосконаленні конструкції освітлювального фільтра та розрахунку основних робочих параметрів установки з метою автоматизації і забезпечення її енергоощадної роботи.*

40. Установка для незалізнення і зм'якшення води. Патент на корисну модель № 85009 / Хомуцька Т.П., Стасюк С.Р., Хоружий П.Д., опубл. 11.11.2013р., бюл. № 21.

*Особистий внесок здобувача полягає в розробці аераційної системи та пропозицій стосовно забезпечення економічно доцільних режимів експлуатації установки.*

### **АНОТАЦІЇ**

**Хомуцька Т.П. Розвиток наукових і практичних засад енергоощадного водопостачання з підземних джерел. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.04 – водопостачання, каналізація. – Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, 2020.

Дисертацію присвячено науковому обґрунтуванню й розробці більш ефективних і досконалих методів розрахунків сумісної роботи водопровідних споруд з урахуванням зміни їхніх характеристик у процесі експлуатації системи та запровадженню заходів для забезпечення енергоощадного водопостачання з підземних джерел. Проведено оцінку ефективності роботи водозабірних свердловин в напірних і безнапірних водоносних пластах при змінах характеристик споруд, встановлено закономірності впливу різних факторів на зменшення подачі води із свердловин в процесі експлуатації. Розроблено числові та аналітичні методи розрахунку системи водопостачання з підземних джерел при врахуванні зміни характеристик насосів, трубопроводів, фільтрів свердловин. Встановлено залежності для визначення основних параметрів автоматизованих систем з гідропневматичними установками, при яких забезпечується економічний режим експлуатації насосів. Науково обґрунтовано та експериментально підтверджено доцільність застосування удосконалених конструкцій фільтрів водозабірних свердловин та нових технологічних схем і конструкцій водознезалізнювальних станцій. Отримали подальший розвиток теорії і методи розрахунків сумісної роботи насосів, водопровідних мереж і

резервуарів в баштових та безбаштових системах водопостачання. Запропоновано імітаційну модель та розроблено метод імітаційного моделювання роботи системи водопостачання, що дозволяє аналізувати різні варіанти водозабезпечення та встановити склад і режими експлуатації споруд при мінімізації питомих витрат електроенергії на подачу води споживачам. Результати роботи впроваджено в нормативні документи та на низці діючих підприємств.

**Ключові слова:** система водопостачання, енергозбереження, підземні води, водозабірна свердловина, насосна станція, система подачі та розподілу води, імітаційна модель, питома витрата електроенергії.

**Хомутецкая Т.П. Развитие научных и практических основ энергосберегающего водоснабжения из подземных источников. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.04 – водоснабжение, канализация. – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, 2020.

Диссертация посвящена научному обоснованию и разработке более эффективных и совершенных методов расчетов совместной работы водопроводных сооружений с учетом изменения их характеристик в процессе эксплуатации системы, а также внедрению мероприятий по обеспечению энергосберегающего водоснабжения из подземных источников. Проведена оценка эффективности работы водозаборных скважин в напорных и безнапорных водоносных пластах при изменениях характеристик сооружений, установлены закономерности влияния различных факторов на уменьшение подачи воды из скважин в процессе эксплуатации. Разработаны числовые и аналитические методы расчета системы водоснабжения из подземных источников при учете изменения характеристик насосов, трубопроводов, фильтров скважин. Установлены зависимости для определения основных параметров автоматизированных систем с гидропневматическими установками, при которых обеспечивается экономичный режим эксплуатации насосов. Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения усовершенствованных конструкций фильтров водозаборных скважин и новых технологических схем и конструкций водообезжелезивающих станций. Получили дальнейшее развитие теория и методы расчетов совместной работы насосов, водопроводных сетей и резервуаров в башенных и безбашенных системах водоснабжения. Предложена имитационная модель и разработан метод имитационного моделирования работы системы водоснабжения, который позволяет анализировать различные варианты водообеспечения, подобрать состав и режимы эксплуатации сооружений при минимизации удельных расходов электроэнергии на подачу воды потребителям. Результаты работы внедрены в нормативные документы и на ряде действующих предприятий.

**Ключевые слова:** система водоснабжения, энергосбережение, подземные воды, водозаборная скважина, насосная станция, система подачи и распределения воды, имитационная модель, удельный расход электроэнергии.

**Khomutetska T.P. Development of scientific and practical bases for energy-saving water supply from underground sources. – Manuscript.**

Dissertation for a doctoral degree in technical sciences in specialty 05.23.04 – water supply, sewerage system. – Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to scientific substantiation and development more effective and improved methods of calculations joint operation water structures considering change of their characteristics during operation the system for developing energy saving measures to ensure drinking water supply from underground sources. The paper evaluates the efficiency of water intake wells, which draw water from the pressure and pressureless aquifers when changes in the characteristics of structures, and also establishes regularities of the influence of various factors on the reduction of water supply from wells during operation. Numerical and analytical calculation methods of the water supply system from underground sources have been developed taking into account changes in the characteristics of pumps, pipelines, well filters. Dependencies have been established to determine the basic parameters of automated systems with hydropneumatic installations, which provide an economical operation mode of the pumps. Expediency of application enhanced designs filters water wells and new technological schemes and designs water deferrization stations have been scientifically substantiated and experimentally confirmed. The theory and methods of calculating the joint work of pumps, water supply networks and reservoirs in tower and non-tower water systems have been further developed. A simulation model is proposed and a method of simulation modeling of the water supply system is developed, which allows to analyze different variants of water supply and to establish the composition and operation modes of structures while minimizing the specific costs of electricity for water supply to consumers. The results of the dissertation research are included in the normative documents and implemented at a number of existing enterprises.

**Keywords:** water supply system, energy saving, groundwater, water well, pumping station, water transmission and distribution systems, simulation model, specific electricity consumption.