

В. М. Жук, О. В. Вербовський, І. Ю. Попадюк, Б. В. Завойко
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра гідравліки та сантехніки

РЕГУЛЮВАЛЬНИЙ ОБ'ЄМ БАКА ГІДРОАКУМУЛЯТОРА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ВОДОПРОВІДНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

© Жук В. М., Вербовський О. В., Попадюк І. Ю., Завойко Б. В., 2016

Основним визначуваним параметром при розрахунку гідроаккумуляторів (ГА) автоматизованих водопровідних насосних станцій є їх регулювальний об'єм. Регулювальний об'єм гідроаккумулятора має бути достатнім для забезпечення допустимої кількості включення насосних агрегатів при заданих характеристиках водоспоживання. Літературний огляд показав, що немає єдиного підходу до опису робочого циклу ГА. Аналіз газових процесів, що відбуваються в баці ГА, показує, що регулювальний об'єм ГА є функцією повного об'єму ГА, а також значень початкового абсолютного тиску p_0 , а також мінімального та максимального абсолютного робочого тиску у баці ГА (відповідно p_1 та p_2). Важливим фактором є також вид газового процесу, що відбувається під час стиснення та розширення повітря в баці ГА. Виконано теоретичний аналіз газових процесів у баках гідроаккумуляторів, що використовуються в складі автоматизованих водопровідних насосних станцій. Отримано значення узагальнених безрозмірних регулювальних об'ємів гідроаккумулятора для ізотермічного та адіабатного процесів, а також політропного процесу з показником $n=1,8$. Мінімальний регулювальний об'єм відповідає політропному процесу розширення газу, що необхідно враховувати при проектуванні водопровідних насосних станцій з гідроаккумуляторами.

Ключові слова: гідроаккумулятор, регулювальний об'єм, водопровідна насосна станція.

Regulation volume is the main parameter, which is determined in the procedure of hydraulic calculation of hydroaccumulators (HA) in the water supply automated pump stations. Regulation volume of hydroaccumulator must be sufficient to ensure the maximum allowable frequency of switching on the pump units for a given water consumption characteristics. Literature review shows that there are no one universal approach to the description of the operating cycle of HA. Analysis of gas processes, occurring in the pressure vessel of HA, shows, that regulation volume is a function of HA total volume and values of the initial absolute pressure p_0 , minimum and maximum operating absolute pressures in the HA vessel (respectively p_1 and p_2). An important factor is the type of gas process, which occurs during the compression and expansion of air in the vessel. The theoretical analysis of the gas processes in the hydroaccumulators, used in automated water supply pump stations, is fulfilled in the paper. Obtained numerical values of generalized dimensionless regulation volume of hydroaccumulator for isothermal and adiabatic processes and for polytropic process with exponent $n=1.8$. The minimal regulation volume corresponds to the polytropic process of gas expansion. This fact must be taken into account when designing the water supply pump stations with hydroaccumulators.

Key words: hydroaccumulator, regulation volume, water supply pump station.

Вступ. Важливим елементом сучасних водопровідних автоматизованих насосних станцій є гідроаккумулятори (ГА), призначені для зменшення частоти вмикань автоматизованих насосних агрегатів (АНА), а також для пом'якшення перехідних гідравлічних процесів під час пусків та зупинок АНА. Незважаючи на широке застосування гідроаккумуляторів на практиці, на цей час немає загальноприйнятої методики розрахунку їх регулювального об'єму.

Мета роботи: виконати літературний огляд та теоретичний аналіз газових процесів у баці гідроакумулятора автоматизованої водопровідної насосної станції з метою визначення його регульовального об'єму.

Гідроакумулятори в системах водопостачання. Гідроакумулятори сьогодні широко застосовуються у різних галузях техніки: у системах водопостачання та різноманітних напірних трубопроводах [4–6], системах об'ємного гідроприводу [1, 2, 8], для акумуляції кінетичної енергії на транспортних засобах [9] тощо.

За конструкцією ГА поділяють на балонні, поршневі та мембранні. Триває пошук нових конструкційних рішень влаштування гідроакумуляторів. Зокрема, в роботі Van de Ven J.D. [10] запропоновано конструкцію гідроакумулятора постійного тиску з поршнем змінної площі поперечного перерізу та метод його гідравлічного розрахунку.

У праці [8] наведено результати останніх наукових досліджень, що стосуються перехідних процесів у гідроакумуляторах, та виконано теоретичний аналіз пульсацій тиску в гідравлічній системі з гідроакумуляторами.

Водопровідні автоматизовані насосні агрегати відомі на практиці під різними назвами: установка для підвищення тиску, гідрофорна установка, мала автоматизована водна система, приватна станція водопостачання, пневматична водонапірна установка, автоматична установка водопостачання тощо. Вони можуть комплектуватися нерегульованими насосами з незмінною робочою характеристикою або ж насосами з регульованою частотою обертання вала, що значно впливає на об'єм гідроакумулятора, яким обладнується АНА.

Розрізняють гідроакумулятори з горизонтальним та вертикальним розташуванням бака. Їх конструкція є аналогічною, причому вертикальні ГА використовують для установок великої продуктивності (як правило, при об'ємах бака понад 50 дм³), а у їхній верхній частині влаштовують спеціальний клапан для відведення повітря, що виділяється з води при зміні її температури під час експлуатації ГА. У ГА горизонтального типу для видалення повітря монтується спеціальний кран або злив, який встановлюють на напірній лінії. У ГА найменших типорозмірів видаляють повітря, повністю зливаючи воду з системи.

У водопровідних АНА найчастіше застосовують ГА мембранного типу (рис. 1). Герметичний корпус бака ГА 3 розділяють спеціальною мембраною 4 на дві камери, що відокремлює воду від повітря. Вода не стикається з металевими поверхнями корпусу, оскільки знаходиться у внутрішній камері-мембрані, яку виготовляють з високоміцних харчових еластомерів, стійких до дії агресивних хімічних середовищ та більшості мікроорганізмів. Так забезпечують відповідність мембрани всім гігієнічним і санітарним нормам щодо питної води.

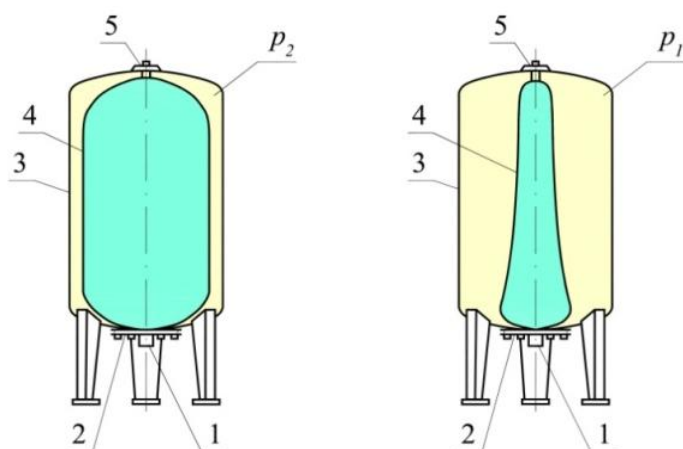


Рис. 1. Принципова схема гідроакумулятора мембранного типу: а – при максимальному робочому тиску p_2 ; б – при мінімальному робочому тиску p_1 ; 1 – штуцер; 2 – фланець; 3 – бак; 4 – мембрана; 5 – ніпель

Вода потрапляє у водяну камеру ГА через штуцер 1. У повітряній камері бака ГА знаходиться ніпель 5, тобто пневматичний клапан, призначений для встановлення початкового робочого тиску.

Основні функції ГА в системі водопостачання:

- 1) захист насоса від передчасного зношування завдяки зменшенню частоти його включень;
- 2) підтримка в заданих межах тиску у водопровідній системі;
- 3) захист системи від гідравлічних ударів під час вмикання та вимикання насоса;
- 4) забезпечення автономного запасу води в системі, що дає змогу користуватися водою у разі короткочасного припинення подачі електроенергії.

На вибір типорозміру ГА впливає низка факторів, які можна поділити на дві основні групи:

- 1) фактори, що характеризують величину та режим водорозбору в системі (тип та кількість санітарно-технічних приладів, кількість споживачів та їх питоме водоспоживання, протяжність та конфігурація водорозподільної мережі тощо);
- 2) характеристики насосного агрегату (напірна характеристика, наявність та тип регулювання режиму роботи насоса, максимально допустима кількість вмикань тощо).

Гідравлічний розрахунок гідроаккумуляторів. Основним визначуваним параметром при розрахунку гідроаккумулятора є його регульовальний об'єм, тобто об'єм води, який потрапляє в мережу при зменшенні абсолютного тиску в баці гідроаккумулятора від максимального до мінімального значення. Регульовальний об'єм гідроаккумулятора має бути достатнім для забезпечення допустимої кількості вмикання насосних агрегатів при заданих характеристиках водоспоживання.

Літературний огляд показав, що немає єдиного підходу до опису робочого циклу ГА. Аналіз газових процесів, що відбуваються в баці ГА, показує, що регульовальний об'єм ГА є функцією повного об'єму ГА, значень початкового абсолютного тиску p_0 , а також мінімального та максимального абсолютного робочого тиску у баці ГА (відповідно p_1 та p_2). Важливим фактором є також вид газового процесу, що відбувається під час стиснення та розширення повітря в баці ГА.

Чинний ДБН В.2.5-64:2012 не дає конкретних рекомендацій щодо визначення регульовального та повного об'єму бака ГА, що встановлюється на напірній лінії після насосної установки, вказуючи, що його "необхідно розраховувати на забезпечення зменшення частоти вмикань насоса до допустимого числа включень" (п. 15.1 [3]).

Згідно з вимогами попереднього галузевого нормативного документа [7], який діяв до 2013 р., регульовальний об'єм бака гідроаккумулятора визначали за формулою:

$$W_{pez} = \frac{Q_{hr}^{nac}}{4 \cdot n}, \text{ м}^3, \quad (1)$$

де Q_{hr}^{nac} – продуктивність насоса, $\text{м}^3/\text{год}$, яку приймають такою, що дорівнює або є більшою за максимальну годинну витрату водоспоживання; n – максимально допустима кількість вмикань насоса за годину; згідно з [7] для установок з гідропневматичним баком рекомендували приймати $n=6-10 \text{ год}^{-1}$.

Повний об'єм бака ГА $W_{ГА}$ згідно з [7] визначали за формулою:

$$W_{ГА} = W_{pez} \frac{B}{1-A}, \text{ м}^3, \quad (2)$$

де B – коефіцієнт запасу, $B=1,2-1,3$; A – відношення абсолютного мінімального тиску до максимального, приймається $0,7 \dots 0,8$.

Залежність (2) впливає з умов ізотермічного розширення ідеального газу від абсолютного максимального тиску до мінімального за припущення, що початковий абсолютний тиск p_0 у баці ГА дорівнює мінімальному робочому тиску p_1 .

Базовий підручник у галузі санітарно-технічного обладнання будівель [4] (с. 124) також розглядає повітря всередині гідропневматичного бака як ідеальний газ та робить припущення щодо ізотермічного процесу стиснення та розширення повітря в процесі роботи ГА. Тоді регульовальний об'єм ГА:

$$W_{pez} = \frac{p_0(p_2 - p_1)}{p_1 p_2} W_{ГА}, \text{ м}^3 \quad (3)$$

Виробники гідропневматичних баків у своїх рекомендаціях щодо визначення регульовального об'єму ГА (наприклад, [6]) виходять з припущення щодо наявності ізотермічного процесу розширення ідеального газу.

Проте в реальному гідроаккумуляторі при стисненні чи розширенні повітря завжди відбувається теплообмін між повітрям, водою та навколишнім середовищем. Тобто, у загальному випадку в баці ГА реалізується політропний процес розширення повітря, причому показник політропи, строго кажучи, залежить від умов роботи ГА і навіть може змінюватися в процесі роботи.

Для політропного процесу розширення повітря

$$W_{pez} = \left[(p_0 / p_1)^{1/n} - (p_0 / p_2)^{1/n} \right] W_{ГА}, \text{ м}^3, \quad (4)$$

де n – показник політропи.

У випадку швидкого перебігу процесу можна у першому наближенні знехтувати теплообміном в системі і вважати процес адіабатним. Тоді

$$W_{pez} = \left[(p_0 / p_1)^{1/k} - (p_0 / p_2)^{1/k} \right] W_{ГА}, \text{ м}^3 \quad (5)$$

де k – показник адіабати.

Порівняємо регульовальний об'єм ГА за умови ізотермічного, адіабатного та політропного процесів. Початковий стан повітря в системі позначено точкою O , що відповідає початковому абсолютному тиску в баці ГА p_0 та об'єму повітря $W_0 \approx W_{ГА}$. Після вмикання насоса тиск у баці ГА підвищується до максимально допустимого значення p_2 , після чого насос автоматично відмикається доти, поки в результаті водорозбору тиск не понизиться до мінімального робочого тиску p_1 . Як видно з рис. 2, регульовальний об'єм ГА, який визначається як різниця об'ємів повітря W_1 та W_2 , істотно залежить від виду газового процесу.

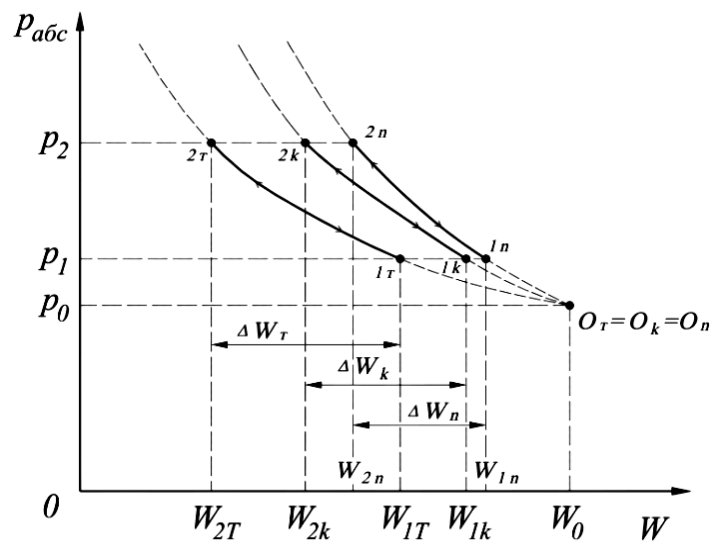


Рис. 2. Схема до визначення регульовального об'єму ГА залежно від виду газового процесу (індекси T , k , n стосуються відповідно ізотермічного, адіабатного та політропного процесу з $n > k$)

Регульовальний об'єм ΔW_T , що відповідає ізотермічному розширенню повітря від точки 2_t до 1_t , є максимально можливим за фіксованих значень p_0 , p_1 та p_2 . Відповідні регульовальні об'єми для адіабатного та політропного процесів є істотно меншими. За умови, що показник політропи є більшим за показник адіабати, що існує при тепловтратах від повітря в баці ГА, найменшим є регульовальний об'єм, що відповідає політропному процесу з максимальним значенням n .

У таблиці наведено значення безрозмірного регульовального об'єму ГА для ізотермічного (W_T'), адіабатного (W_k') та політропного (W_n') процесів для поширених на практиці комбінацій

початкового абсолютного тиску p_0 , а також мінімального та максимального робочого тиску p_1 та p_2 . Безрозмірний регулювальний об'єм визначали як частку регулювального об'єму та повного об'єму ГА. Показник адіабати для повітря дорівнює $k=1,4$. Безрозмірний регулювальний об'єм для політропного процесу визначено для значення показника політропи $n=1,8$.

Таблиця

Значення відносного регулювального об'єму ГА

№ з/П	p_0 , бар	p_1 , бар	p_2 , бар	W_T'	W_k'	$W_n' (n=1,8)$	W_T' / W_n'	W_k' / W_n'
1	1,6	2	2,5	0,16	0,1256	0,1030	1,553	1,220
2	1,8	2	3,5	0,3857	0,3056	0,2520	1,530	1,213
3	2,8	3	4	0,2333	0,1768	0,1422	1,641	1,244
4	2,3	2,5	3,5	0,2629	0,2013	0,1628	1,615	1,237
5	2,3	2,5	4	0,3450	0,2687	0,2194	1,572	1,225
6	2,8	3	3,5	0,1333	0,0992	0,0790	1,688	1,256
7	2,8	3	5	0,3733	0,2910	0,2378	1,570	1,224
8	3,3	3,5	5	0,2829	0,2156	0,1740	1,626	1,240
9	3,3	3,5	6	0,3929	0,3064	0,2504	1,569	1,223
10	3,8	4	6	0,3167	0,2424	0,1960	1,615	1,237
11	3,8	5	9	0,3378	0,2818	0,2392	1,412	1,178
12	5	6	11	0,3788	0,3085	0,2584	1,466	1,194

Висновки. У роботі виконано теоретичний аналіз газових процесів у баках гідроаккумуляторів, що використовуються в складі автоматизованих водопровідних насосних станцій. Отримано значення узагальнених безрозмірних регулювальних об'ємів гідроаккумулятора для ізотермічного та адіабатного процесів, а також політропного процесу з показником $n=1,8$. Мінімальний регулювальний об'єм відповідає політропному процесу розширення газу, що необхідно враховувати при проектуванні водопровідних систем з гідроаккумуляторами.

1. Андреев М. А. Способ регулирования пневмогидравлической подвески многоосного транспортного средства с изменяемой упругой характеристикой // Дис. ... канд. техн. наук по спец. 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины, 05.04.13 – Гидравлические машины и гидропнеумоагрегаты. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 175 с. 2. Гусев М. П., Данилов В. Л. Исследование зависимости полезного объема жидкости гидроаккумулятора от его рабочих параметров: Электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н. Э. Баумана “Наука и образование” январь 2012. – № 01. 3. ДБН В.2.5-64:2012. Внутрішній водопровід та каналізація. Ч. I. Проектування. Ч. II. Будівництво. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 105 с. 4. Кедров В. С., Ловцов Е. Н. Санитарно-техническое оборудование зданий: учеб. для вузов. – М.: Стройиздат, 1989. – 495 с. 5. Мандрус В. I. Гідравлічні та аеродинамічні машини. – Львів: Магнолія плюс, 2005. – 340 с. 6. Профессиональное проектирование и расчет оборудования Reflex // Руководство по проектированию и расчету мембранных расширительных баков, гидроаккумуляторов, установок поддержания давления, подпитки и дегазации. – Reflex. – 2015. 7. СНуП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. – М.: Стройиздат, 1984. 8. Mamčič S., Bogdevičius M. Simulation of dynamic processes in hydraulic accumulators // Transport, 2010. – 25(2). – P. 215–221. 9. Puddu P., Paderi M. Hydro-pneumatic accumulators for vehicles kinetic energy storage: Influence of gas compressibility and thermal losses on storage capability // Energy, 2013. – 57. – P. 326–335. 10. Van de Ven J.D. Constant pressure hydraulic energy storage through a variable area piston hydraulic accumulator // Applied Energy. – 2013. – 105. – P. 262–270.