

# Моделювання режимів роботи вакуумних систем автоматизованих насосних станцій

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.031>

Юрій Філіпович

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
y.y.filipovych@nuwm.edu.ua

Назарій Стельмах

Національний університет водного господарства та природокористування  
м. Рівне, Україна  
n.o.stelmakh@nuwm.edu.ua

**Анотація** – Змодельовано вплив параметрів вакуумних установок на характер технологічного процесу вакуумної системи. Розроблено принципи подібності для перерахунку характеристик робочого циклу вакуумних установок.

**Ключові слова** – вакуумна установка; залив насоса; робочий цикл вакуумної системи; живильна труба вакуумного котла; принцип подібності.

**Ефективна експлуатація** автоматизованих насосних станцій (АНС) в значній мірі залежить від підтримання їх основного та допоміжного обладнання у справному стані, роботи відцентрових насосів при високих к.к.д., дотримання контролю за витратою насосів, впровадження засобів автоматизації і телемеханіки. Надійним видом заповнення водою та подальшого підтримання у залитому стані відцентрових насосів є використання вакуумних систем.

Сучасна автоматизована насосна станція є великим гідроенергетичним вузлом. Він складається із гідротехнічних, енергетичних і будівельних споруд, енергетичного і гідромеханічного обладнання. Кожен елемент системи забезпечує безвідмовну роботу обладнання, тому від роботи вакуум-системи залежить робота всієї насосної станції [1]. Вакуумні системи відносяться до допоміжного обладнання АНС, але забезпечують надійну роботу відцентрових насосів, отже дослідження їх технологічних процесів є актуальним питанням.

**Наукове завдання** полягає у дослідженні технологічних процесів систем заповнення водою відцентрових насосів, удосконаленні методики розрахунку робочих циклів вакуумних установок та їх елементів.

**Об'єктом досліджень** є робочий цикл вакуумної системи, а предметом досліджень – конструкції вакуумних систем, тривалість робочого циклу та вплив параметрів вакуумної установки на її експлуатаційні характеристики.

**Метою досліджень** є удосконалення існуючих та розробка нових аналітичних та чисельних методів розрахунку робочих циклів вакуумних систем АНС.

**Розроблено методику** проведення досліджень для зняття робочих характеристик вакуум-насоса та ежектора і параметрів робочого циклу вакуумної

системи та методику досліджень для визначення впливу заповнення водою вакуум-насоса на його робочу характеристику, а також для визначення витрати повітря, яке підсмоктується до вакуумної системи.

Залежність для перерахунку об'ємної витрати повітря ( $Q$ ), підсмоктаного у вакуумний котел, у координати масової витрати ( $G$ ), описується лінійною залежністю

$$G = \alpha - \beta \cdot h_{\text{вак}}, \quad (1)$$

де  $h_{\text{вак}}$  – вакуум у вакуумній системі, м;  $\alpha, \beta$  – емпіричні коефіцієнти.

Під час чисельних та аналітичних розрахунків користуватися характеристиками у координатах масової витрати ( $G-h_{\text{вак}}$ ) зручніше, ніж характеристикою приведеної об'ємної витрати ( $\bar{Q}-h_{\text{вак}}$ ), тому що поняття масова витрата є більш чітким і визначеним, ніж поняття приведена об'ємна витрата повітря [2].

Основною характеристикою роботи вакуумної системи є її **робочий цикл** – так називається технологічний процес, під час якого робочі та резервні відцентрові насоси з допомогою вакуум-систем перебувають у готовності до пуску, тобто у заповненому водою стані.

Збільшення тривалості робочого циклу вакуум-системи у більшості випадків пов'язане із додатковими витратами енергії або фінансів. Наприклад, збільшення висоти і площі вакуумного котла і площі живильної труби вимагає додаткових капіталовкладень [3, 7]. Але збільшення часу робочого циклу зменшує зношення насосного обладнання і витрати енергії при експлуатації.

Із зростанням початкової відмітки води  $Z_A$  від 3,0 до 3,6 м, тобто із зменшенням прошарку повітря у вакуумному котлі ( $Z_K=4,56$  м=const), тривалість робочого циклу скорочується від 1020 до 780 с. Отже доцільно призначати позначку початкової відмітки по-можливості більш низькою, але не нижчою відмітки верху корпусів насосів, розміщених під заливом. Збільшення діаметра живильної труби  $d$  від 50 до 200 мм призводить до помітного збільшення часу циклу  $t_{\text{ц}}$  від 855 до 1245 с [6].

Збільшення площі поперечного перерізу  $S_K$  вакуумного котла від 0,3 до 0,9 м<sup>2</sup> викликає зростання  $t_{\text{ц}}$  від 676 до 993 с. Із зростанням об'єму котла час робочого циклу збільшується, що пояснюється більшим об'ємом прошарку повітря у вакуум-котлі. Але, оскільки ціна матеріалу, з якого виготовляється котел при цьому теж збільшується, то питання про розміри вакуум-котла потрібно вирішувати в результаті техніко-економічного порівняння варіантів.

При зростанні часу роботи вакуум-насоса у робочому циклі  $t_1$  від 15 до 60 с, відзначалося збільшення часу робочого циклу  $t_{\text{ц}}$  від 615 до 1330 с [6]. За більший час закачування рівень води у вакуумному котлі підніметься на вищу позначку, а зменшення відмітки води при подібних умовах експлуатації установки буде практично однаковою.

Збільшення коефіцієнта витрати живлячої труби  $\mu$  від 0,2 до 0,7 викликає збільшення робочого циклу  $t_{\text{ц}}$  від 807 до 964 с. При усіх інших рівних умовах  $\mu$  збільшується разом із збільшенням діаметра і зменшенням довжини труби, то її доцільно проектувати якомога більших поперечних перерізів і більш короткою.

Виконано перевірку методики розрахунку часу заповнення водою відцентрового насоса, яку проведено на діючій насосній станції меліоративно-екологічного комплексу базового господарства науково-навчально-виробничого центру КСП "Світанок" в с. Бечаль Костопільського району Рівненської області.

Виконане енерго-економічне порівняння роботи вакуум-систем АНС, оснащених вакуумним насосом і ежектором. Проведено ряд досліджень робочих циклів вакуум-системи, оснащеної різними вакуумними насосами (РМК-2\* та RV-550-01-EE) і ежектором із трьома змінними соплами (діаметрами 25, 30 і 35 мм). Крім того, було проведено ряд розрахунків на ЕОМ робочих циклів вакуумних систем, що оснащені іншими вакуумними насосами типу КВН, ВВН і РМК. Розрахунки свідчать, що при усіх однакових геометричних параметрах вакуум-системи та однаковому часі роботи вакуумного насоса або ежектора, кращі енерго-економічні показники мають вакуумні насоси.

Таблиця 1

**Енерго-економічні характеристики вакуумної системи у залежності від марки вакуум-насоса або діаметра сопла ежектора**

Марка вакуум-насоса	Час робочого циклу, $t_{\text{ц}}$ , с	К-ть увімкнень обладнання за рік, $n$	Час роботи ел. двигуна, $t_{\text{дв}}$ , год	Витрачена енергія, $E$ , кВт.год	Вартість ел.енергії, $S$ , грн/рік
<b>вакуум-насоси</b>					
КВН-8	562	56153	476,94	1335,4	173,60
ВВН-1,5	968	32601	271,68	1086,7	141,27
ВВН-12	1240	25450	212,08	4241,6	551,41
РМК-2*	840	37569	313,08	3130,8	407,00
РМК-4	1223	25803	215,03	15052,1	1956,77
RV-550-01-EE	753	41910	349,25	2619,4	340,52
<b>ежектор</b>					
сопло $\varnothing$ 25мм	272	115942	966,18	16908,15	2198,06
сопло $\varnothing$ 30мм	416	75808	631,73	11055,28	1437,19
сопло $\varnothing$ 35мм	373	84547	704,56	12329,8	1602,87

Пуск ежектора потребує також увімкнення відцентрового насоса, для подачі рідини у камеру змішування ежектора. Цей насос, у свою чергу, також потребує заповнення водою. Для цього необхідно встановити один вакуумний насос. Тому,

при створенні систем заповнення водою відцентрових насосів рекомендується використовувати вакуум-насос.

Удосконалено метод визначення характеристик підсмоктаного повітря. Він полягає у тому, що замість розв'язання системи із 3÷5 рівнянь, потрібно визначити середні значення масової витрати повітря

$$G'_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n G'_i}{n}, \text{ і коефіцієнта } E_{\text{сеп}}: E_{\text{сеп}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n}.$$

Потім задаємося будь-яким параметром витрати повітря через нещільності вакуумної системи, що омиваються водою ( $\Delta G$ ) або через нещільності, що перебувають в повітрі ( $S_H$ ) – і визначаємо інший

$$S_H = \frac{G'_{\text{сеп}} - \Delta G}{E_{\text{сеп}}}. \quad (2)$$

Перевірка цієї методики показує, що похибка буде у межах точності розрахунку (близько 2%), якщо прийняти  $\Delta G + S_H \cdot E = \text{const} = G'_{\text{сеп}}$ .

Використані **принципи подібності** для перерахунку параметрів робочого циклу вакуум-системи із дотриманням виконання умов подібності натурних і модельних параметрів системи [5]. Розроблено методику визначення приведеної площі живлячої труби  $\mu \cdot S_T$ . Після розрахунків було отримано середні її значення. Для кожної серії дослідів будуємо криву (рис.1). Використовуючи її можна побудувати графіки робочого циклу для будь-якої вакуум-системи, оснащеної живлячою трубою з показником  $\mu \cdot S_T$  меншим, або рівним, ніж максимальне значення на рис.1, тобто менше, ніж  $\bar{\mu} \cdot \bar{S}_T = 0,0116 \text{ м}^2$ .

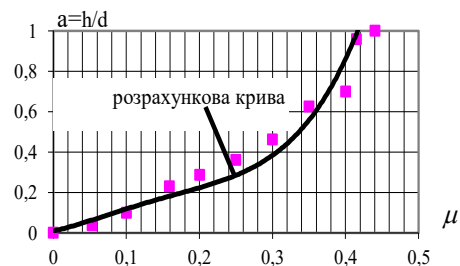


Рис. 1. Крива  $\mu=f(h/d)$

Крива  $\mu=f(h/d)$  показує, що при зменшенні величини відкриття засувки, коефіцієнт витрати  $\mu$  спочатку зменшується дуже повільно, а потім зменшення безперервно зростає і при відкритті  $h/d=0$  коефіцієнт витрати також виявляється рівним нулю [4].

Виконана перевірка на вакуум-установці, оснащений живильними трубами з різними діаметрами (200 мм, 81,5 мм і 50 мм) свідчить, що координати характерних точок графіків робочих циклів вакуум-систем, які ми порівнюємо, практично співпали.

Для визначення характеристики приведеної площі живлячої труби вакуумного котла маємо залежність

$$\mu \cdot S_T = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{d^{4/3}}{124,5 \cdot l \cdot n^2 + d^{4/3} \cdot \sum \zeta_i}}, \quad (3)$$

де  $l$  - довжина труби, м;  $n$  - коефіцієнт шорсткості стінок труби;  $\sum \zeta_i$  - сума коефіцієнтів місцевих опорів;  $d$  - діаметр труби, м.

Із наведеної формули видно, що при зростанні діаметра труби  $d$  параметр  $\mu \cdot S_T$  зростає, а зростання довжини труби  $l$ , коефіцієнта шорсткості стінок труби  $n$  та суми коефіцієнтів місцевих опорів  $\sum \zeta_i$  викликає зменшення. При виведенні формули не застосовувалися ніякі обмеження. Отже вона дійсна для будь-яких величин  $d$ ,  $l$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  живильних труб вакуум-котлів. Встановлено вплив параметра  $\mu \cdot S_T$  на тривалість робочого циклу  $t_{\text{ц}}$ , тривалість третього періоду спадання відмітки води у вакуумному котлі  $t_3$ , вакууму  $h_{\text{вак},B'}$  та на рівні води у вакуум-котлі  $Z_B$  та  $Z_C$  [7, 8].

На рис. 2 наведено графіки залежності чотирьох названих вище елементів робочого циклу від параметра  $\mu \cdot S_T$ .

Графіки говорять про те, що зі зростанням  $\mu \cdot S_T$  вакуум  $h_{\text{вак},B'}$  знижується, а рівень  $Z_B$ , навпаки, зростає. Різниця  $(h_{\text{вак},B'} - Z_B)$  прямує до нуля. Взаємне наближення  $h_{\text{вак},B'}$  та  $Z_B$  призводить до скорочення часу другого періоду ( $t_2$ ) у робочому циклі.

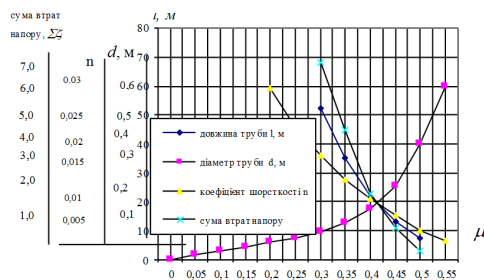


Рис.2. Графіки залежності  $l$ ,  $n$ ,  $d$  та  $\sum \zeta_i$  від коефіцієнта витрати  $\mu$

Проводячи вертикальні перерізи графіків на рис.2 можемо отримати параметри для побудови графіків робочого циклу вакуум-системи.

Отримані графіки залежності величин  $l$ ,  $d$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  від коефіцієнта витрати живлячої труби  $\mu$  говорять про те, що із збільшенням  $l$ ,  $n$  та  $\sum \zeta_i$  коефіцієнт витрати живлячої труби зменшується. З рис.2 випливає, що із зменшенням  $\mu$  тривалість робочого циклу вакуум-системи при постійному часу роботи вакуум-насоса також зменшується. Це призводить до збільшення енергоємності робочого процесу вакуумної установки. Отже, для економії при експлуатації вакуумної установки довжину живлячої труби, коефіцієнт шорсткості і коефіцієнт місцевих опорів слід якомога зменшувати.

### Висновки

1. Розрахунковим і експериментальним шляхом отримано графічну залежність часу

робочого циклу вакуум-системи від початкової позначки води у вакуум-котлі, висоти та площі поперечного перерізу вакуум-котла, часу роботи вакуум-насоса, площі живлячої труби вакуум-котла та коефіцієнта витрати живлячої труби.

2. Запропоновано нові залежності для експериментального визначення витрати повітря, підсмоктаного у вакуум-систему. Отримана аналітична залежність для визначення приведеної площі живлячої труби та графічна залежність вакууму і рівнів води у вакуум-котлі та часу усіх періодів робочого циклу від значень приведеної площі живлячої труби.

3. Отримано залежність коефіцієнта витрати та приведеної площі живлячої труби від довжини, діаметра і коефіцієнта шорсткості стінок труби, а також суми втрат напору у ній.

4. Результати роботи дозволяють при реконструкції, проектуванні та експлуатації насосних станцій визначати параметри основних елементів вакуумних систем з метою забезпечення більшої часу робочого циклу та економії електроенергії під час їх роботи.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Філіпович Ю. Ю. Вплив заповнення водою вакуум-насоса на характер його роботи // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Вип. 23.- Рівне, 1998.- С. 87-92.
- [2] Філіпович Ю. Ю. Розрахунок на ЕОМ робочого циклу вакуумної системи з ежекторною установкою // Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Вип. 23.- Рівне, 1998.- С. 83-87.
- [3] Філіпович Ю. Ю. Вплив розмірів елементів вакуумної системи автоматизованої насосної станції на тривалість її робочого циклу // Водне господарство України.- 1999.- № 5-6.- С. 39-41.
- [4] Філіпович Ю. Ю. Моделювання робочого циклу вакуумної установки // Вісник РДТУ.- Вип. 2.- Ч. 1. - Рівне, 1999.- С. 237-240.
- [5] Назаров М. Т., Філіпович Ю. Ю. Робочий процес вакуумної установки автоматизованої насосної станції і зв'язок його з параметрами живлячої труби // Вісник РДТУ. Гідромеліорація і гідротехнічне будівництво.- Зб. наук. праць. Спецвипуск.- Рівне, 1999.- С. 145-151.
- [6] Назаров М. Т., Філіпович Ю. Ю. Вплив параметрів живлячої труби вакуумної установки на її енерго-економічні показники // Водне господарство України.- 2000.- № 3-4.- С. 53-54.
- [7] Філіпович Ю.Ю. Надійність роботи вакуумних систем автоматизованих насосних станцій // Збірник тез III Міжнародної науково-практичної конференції «Євразійські наукові дискусії», 10-12 квітня 2022 р., Барселона, Іспанія. – The 3rd International scientific and practical conference “Eurasian scientific discussions” (April 10-12, 2022) Barca Academy Publishing, Barcelona, Spain. 2022. – р. 87-92. Код доступу: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/04/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-10-12.04.22.pdf>.
- [8] Філіпович Ю.Ю. Обґрунтування параметрів надійної роботи допоміжного обладнання автоматизованих насосних станцій // Збірник тез XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Multidisciplinary academic research, innovation and results», 05-08 квітня 2022 р., Прага, Чехія. – Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference. Prague, Czech Republic, April 05 – 08, 2022. – р. 783-788. Код доступу: <https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2022/04/Multidisciplinary-academic-research-innovation-and-results.pdf>