

О. А. Махов

УМОВИ РОБОТИ ТА РЕСУРС ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В СИСТЕМАХ ЗРОШУВАННЯ В ЗАХИЩЕНОМУ ҐРУНТІ

В статті проведено дослідження умов роботи та ресурсу відцентрових насосів, що застосовуються у системах зрошування в умовах захищеного ґрунту. Проаналізовано основні причини відмов насосного обладнання, розглянуто типові несправності. Наведені статистичні дані та результати польових опитувань підтверджують, що близько третини відмов спричиняються гідравлічними факторами, чверть – механічним зношенням, тоді як електричні й експлуатаційні чинники становлять значну, але менш систематизовану частку.

Важливу увагу приділено аналізу впливу робочого середовища на довговічність насосів. У тепличних умовах вони працюють за підвищеної вологості, коливань температури, наявності агресивних домішок у воді та частих пусків-зупинок. У роботі наведено результати досліджень, що доводять значний негативний вплив абразивних частинок і кавітаційних процесів на проточну частину насоса. Додатково розглянуто роль нестабільності електроживлення, перевантаження двигунів, а також впливу людського фактору, зокрема помилок монтажу, нехтування профілактичним обслуговуванням і використання неякісних комплектуючих.

Систематизовано сучасні наукові підходи до підвищення ресурсу насосного обладнання: вдосконалення конструкцій робочих органів та гідравлічних профілів для уникнення кавітації, застосування зносостійких і корозійностійких матеріалів, використання захисних покриттів, модернізація систем ущільнень і підшипників. Показано ефективність впровадження інноваційних технологій, зокрема полімерних та композитних імперелів, керамічних накладок, а також систем віброзахисту. Значну увагу приділено питанням організації технічного обслуговування: перехід від реагуючих ремонтів до превентивних і умовно-профілактичних стратегій, запровадження вібраційної діагностики, моніторингу тиску й температури, що дозволяє своєчасно виявляти зародження дефектів.

Практична значимість дослідження полягає у формуванні комплексу рекомендацій для підвищення довговічності та надійності насосного обладнання в тепличних господарствах. Застосування інтегрованого підходу, що включає технічні, експлуатаційні й організаційні рішення, забезпечить зменшення експлуатаційних витрат, підвищення ефективності зрошувальних систем і стабільність виробництва овочевої продукції у захищеному ґрунті. Отримані результати можуть бути корисними як для інженерів-проектувальників насосів, так і для практиків аграрного сектору, які прагнуть підвищити ресурсність та економічну ефективність експлуатації зрошувальних систем.

Ключові слова: відцентровий насос, система зрошування, захищений ґрунт, ресурс, живильні розчини, абразивне спрацювання, кавітація, корозія, довговічність, тепличне господарство.

Актуальність теми

У сучасних умовах підвищеної уваги до продовольчої безпеки, екологічної ефективності та сталого розвитку аграрного сектору особливої актуальності набуває інтенсивне овочівництво в умовах захищеного ґрунту. Захищений ґрунт – це штучно створене середовище, що дозволяє вирощувати сільськогосподарські культури незалежно від кліматичних умов, забезпечуючи контрольовані показники температури, вологості, освітлення і водопостачання.

Однією з основних підсистем у технологічному процесі в захищеному ґрунті є система

зрошення (рис. 1). Вона забезпечує подачу води та мінеральних речовин до кореневої системи рослин у необхідній кількості, у відповідний час і в оптимальній концентрації. Надійність, енергоефективність і довговічність зрошувальних систем безпосередньо впливають на продуктивність вирощування культур, вартість експлуатації теплиць і загальну рентабельність аграрного виробництва.

Система зрошування складається з таких основних елементів:

- подаючий насос (відцентровий насос, що забирає воду з мережі, колодязя, відкритої водойми, тощо);
- гідроаккумулятор, або бак запасу води великого об'єму;
- фільтри (дискові, піщано-гравійні) – для механічного очищення води;
- насос системи зрошення – безпосередньо подає живильний розчин для зрошення рослин;
- трубопроводи та запірна арматура (труби, крани, зворотні клапани, тощо);
- система автоматизації зрошування та підмішування добрив у зрошувальну воду (фертигація).

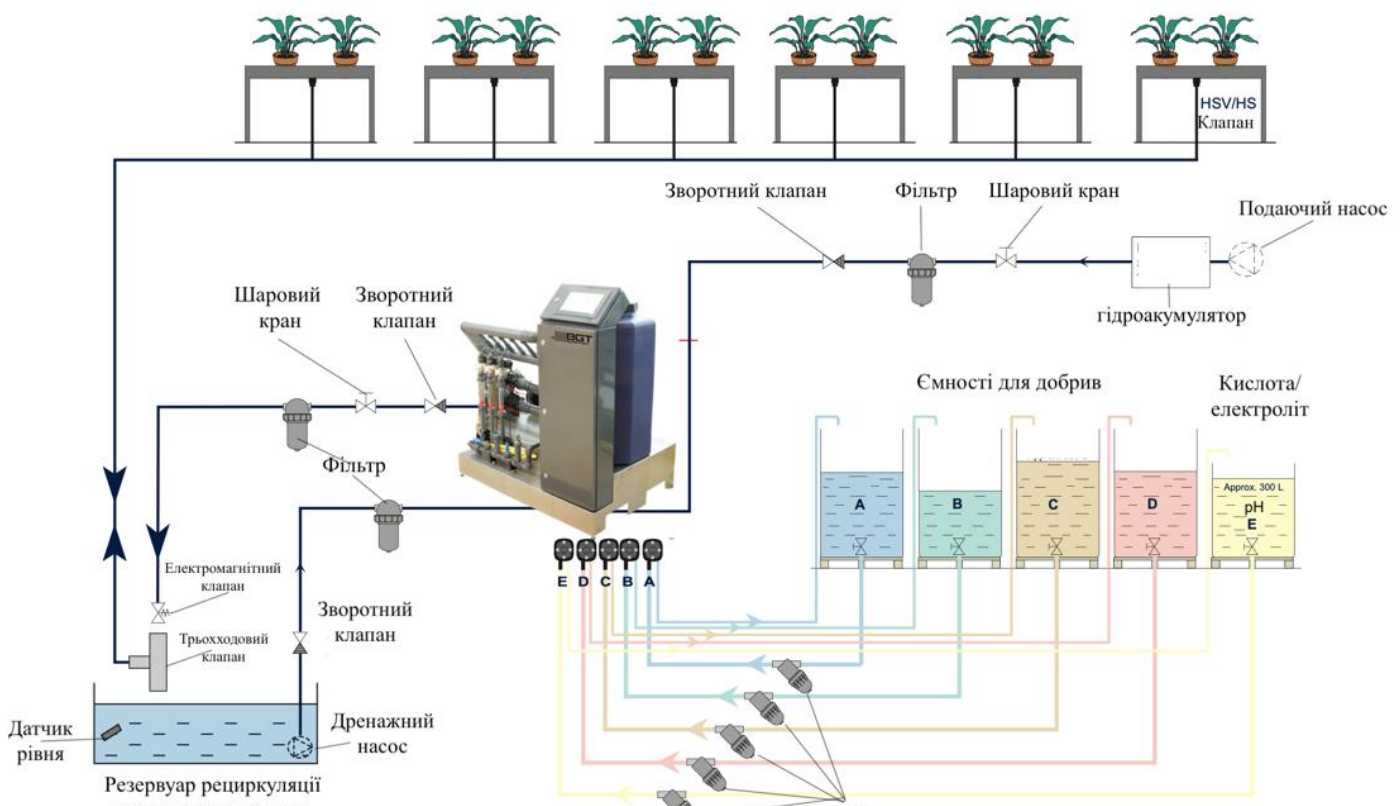


Рис.1. Схема системи зрошування в умовах захищеного ґрунту

Нами було проведено дослідження методом опитування компаній, котрі займаються встановленням та обслуговуванням систем зрошування в умовах захищеного ґрунту, а також інженерів тепличних господарств України. В ході цього опитування було визначено, що одним з найбільш вразливим елементів системи зрошування є насосне обладнання. А саме – відцентрові насоси (рис. 2), що використовуються для перекачування води або спеціальних живильних розчинів. Вони повинні функціонувати за різних температурних умов, з змінними параметрами середовища та рідин, що зрошують рослини. Погіршення роботи насосів знижує ефективність зрошувальних систем, що у свою чергу, може призвести до значних економічних втрат в агробізнесі. В умовах тепличного господарства на насоси впливають специфічні чинники: підвищена вологість повітря, температурні коливання, дія агресивних домішок у воді, часті пуски/зупинки, абразивні компоненти та біологічні засмічення.

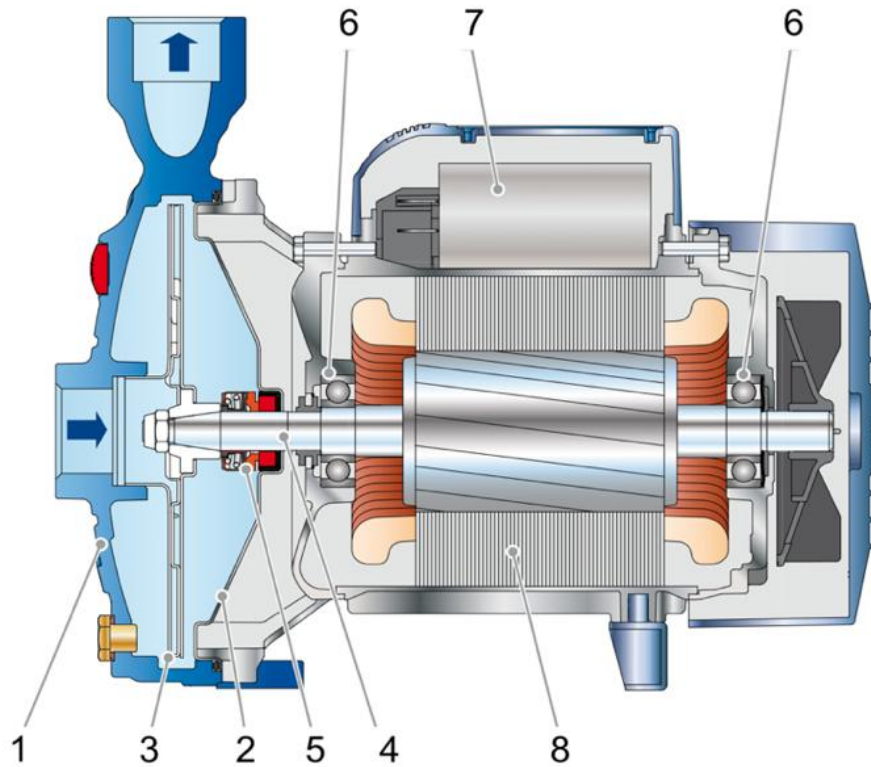


Рис. 2. Будова відцентрового насоса
(на прикладі моделі Pedrollo CP)

1 – корпус насоса, 2 – задня частина корпусу, 3 – робоче колесо(крильчатка), 4 – вал двигуна, 5 – механічне ущільнення(сальник),
6 – підшипники, 7 – конденсатор, 8 – електромотор

Крім того, недостатнє дослідження робочих характеристик насосів в таких специфічних умовах призводить до нераціонального вибору обладнання, що також є проблемою для розвитку сучасного агровиробництва. Усі ці чинники значною мірою знижують ресурс насосів, спричиняючи підвищення експлуатаційних витрат, збільшення кількості аварійних зупинок, і, як наслідок, зниження ефективності роботи всієї тепличної інфраструктури. Це вимагає ретельного аналізу умов роботи насосів у таких системах, дослідження впливу робочого середовища на довговічність їх компонентів та розробки інженерно-технічних рішень щодо подовження ресурсу насосного обладнання.

Метою цього дослідження є аналіз впливу гідравлічних, механічних і експлуатаційних факторів на ресурс відцентрових насосів, які застосовуються в системах зрошення закритого ґрунту, з подальшим визначенням шляхів оптимізації режимів їх роботи для підвищення ефективності та зниження зношування. Також, ця тема є надзвичайно актуальною як з наукового, так і з практичного погляду. Результати цього дослідження можуть бути корисними як для конструкторів насосів, так і для інженерів, що експлуатують системи зрошення в умовах захищеного ґрунту.

Аналіз попередніх досліджень

Відцентрові насоси, що працюють у системах зрошення, виникають різні види несправностей. Дослідники класифікують основні причини відмов на чотири групи: механічні, гідравлічні, електричні та експлуатаційні. За статистичними даними, близько 32 % відмов пов'язані з гідравлічним зносом (кавітація, корозія робочих коліс тощо (рис. 3), 25 % – з механічним зношенням деталей (підшипники, ущільнення, вал), 14 % спричинені загальною корозією, 11 % припадає на кавітацію як окремий фактор, 10 % – на підвищені вібрації, і ще близько 8 % – на інші причини (помилки монтажу, потрапляння чужорідних об'єктів) [1].



Рис. 3. Зношені (1 – 2) та нове (3) робочі колеса відцентрових насосів

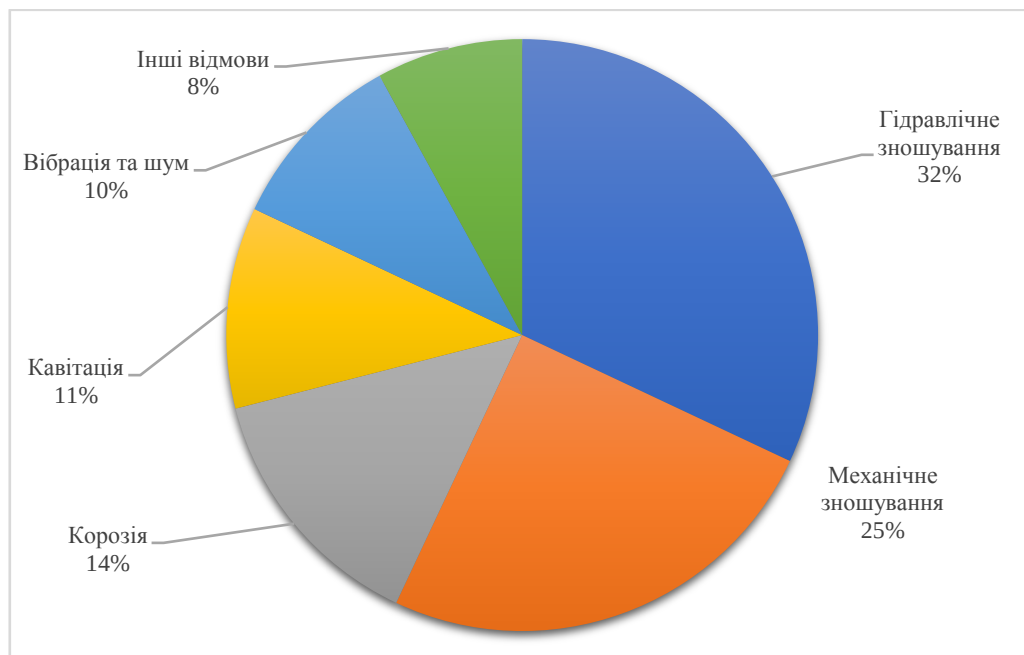


Рис. 4. Статистичні дані виходу з ладу відцентрових насосів [1]

Механічні причини відмов насосів

Механічні несправності виникають через зношення або поломку внутрішніх вузлів насоса. До них належать насамперед відмови підшипників, ущільнень та валів, що можуть викликатися втому матеріалу, неправильним вирівнюванням насосного агрегату, незадовільним змащуванням або надмірними вібраціями [1], [2]. Огляд літератури показує, що типові механічні проблеми включають руйнування підшипників, протікання через знос механічних ущільнень, згин чи поломку насосного вала, а також тріщини від втоми матеріалу [1], [2]. За одними оцінками, саме на механічне зношення компонентів припадає приблизно чверть всіх відмов відцентрових насосів [1].

Практичні дослідження підтверджують значущість цих причин. Зокрема, у польовому опитуванні в Індії, у насосах для зрошення найпоширенішими проблемами виявилися протікання та надмірний шум – їх відзначали приблизно у 31 % випадків (таблиця 1). Ці явища були пов'язані з механічними факторами: спрацюванням сальників (набивок) і ущільнень, неправильним центруванням валу, а також абразивним зносом деталей через пісок у воді. Накопичення твердих частинок у проточній частині призводить до стирання робочих поверхонь ущільнень, робочого колеса і вала, що викликає протікання і вібрації.

Правильне вирівнювання агрегату та застосування якісних ущільнювачів здатні зменшити ці проблеми [3].

Таблиця 1

Частота виникнення раптових відмов у відцентрових насосах систем зрошування [3]

Тип відмов	% відмов	Стандартне відхилення
Надмірний шум	31,1	0,618
Перегрів	37,5	0,669
Підтікання	31,7	0,452
Відсутність всмоктування	41,5	0,628
Відсутність подачі	44,2	0,515

В роботі [4] описано випадок масових відмов насосної станції зрошення в Каліфорнії, де надмірні вібрації під час запусків та роботи призвели до руйнування підшипників і серйозного пошкодження валу, втулок та робочих лопатей насоса. Через розбалансування ротора і резонансні коливання ресурс найдовше працюючого насоса становив лише ~1400 годин. Цей випадок демонструє, що механічні несправності часто тісно пов'язані з вібраційними навантаженнями (що можуть мати як конструктивні, так і експлуатаційні причини), та підкреслює важливість контролю вібрацій і своєчасної заміни зношених деталей.

Гідравлічні причини відмов

Гідравлічні проблеми виникають через неправильні режими течії рідини або взаємодію потоку з матеріалами насоса. Один із головних факторів – кавітація, тобто утворення парових бульбашок у зоні зниженого тиску та їх схлопування. Кавітація призводить до ерозійного руйнування поверхні робочого колеса і різкого зниження подачі насоса [1]. У літературі кавітація послідовно згадується як одна з основних причин відмов насосів, що супроводжується шумом і вібраціями [1], [2]. Інші гідравлічні явища, що шкодять насосам, включають гідравлічні удари, пульсації тиску, а також невірне радіальне й осьове навантаження на робоче колесо поза точкою найкращого КПД [2]. Такі режими можуть викликати підвищені вібрації і прискорений знос компонентів.

Ерозійний знос робочих коліс через тверді домішки у воді – особливо актуальна проблема для насосів, що перекачують річкову або каналну воду на зрошення. Дослідження, проведене на великому зрошувальному проєкті річки Хуанхе (Китай), показало, що дрібний пісок у воді викликає утворення канавок, мікротріщин і каверн на лопатях двостороннього центробіжного насоса вже після кількох тисяч годин роботи. Значне зношення імелера спостерігалось після ~2000 – 3000 год, а приблизно через 10000 год накопичені пошкодження призводили до аномальної вібрації агрегату [5]. Таким чином, абразивні частинки в зрошувальній воді (осад, пісок) здатні суттєво скоротити ресурс насосів. Польові обстеження в Україні та за кордоном підтверджують цей факт: домішки піску в воді викликають інтенсивний знос проточної частини насосів і ущільнень, якщо не забезпечено належної фільтрації [3]. Крім того, корозія матеріалів унаслідок агресивної або насиченої киснем води теж належить до гідравлічних причин відмов – вона може уразити корпус, робоче колесо та інші частини, спричиняючи 10–15 % від загального числа поломок [1].

Електричні причини відмов

Електричні аспекти відмов здебільшого стосуються електродвигунів насосів та живлення. У системах з електроприводом поширені випадки, коли насос виходить з ладу через проблеми з живленням: перепади напруги, фазний дисбаланс або відмова електричних компонентів [6]. За даними галузевих джерел, нестабільна напруга та перешкоди в мережі частою прихованою причиною пошкодження насосів на зрошувальних об'єктах. Різкі стрибки напруги або імпульси (наприклад, від удару блискавки), а також тривале відхилення напруги від номіналу – як у бік підвищення, так і зниження – призводять до перегріву

електродвигуна і виходу його з ладу. Зокрема, огляди несправностей на віддалених фермах показали, що понижена напруга в мережі (наприклад, через велику відстань від трансформатора або перевантаження лінії) стає вірогідною причиною незворотного пошкодження насосного двигуна [6]. За зниженої напруги двигун споживає підвищений струм, сильно гріється, що прискорює деградацію ізоляції обмоток.

Окрім якості напруги, важливим фактором естан електричних з'єднань і захисту. Ненадійні або ослаблені контакти в силовому колі можуть спричиняти перегрів і іскріння, фазний дисбаланс у трифазних системах, а отже – роботу двигуна на неномінальному режимі. Згідно з рекомендаціями інженерних керівництв, коливання температур і струмів здатні послаблювати клеми; втрата контакту на одній з фаз призводить до локального перегріву, пробою ізоляції обмоток і міжфазного короткого замикання в двигуні [7]. У результаті це означає повний вихід насоса з ладу через електричну несправність. Для запобігання таким ситуаціям фахівці рекомендують оснащувати насосні станції відповідними захистами: реле контролю фаз/напруги, пристроями захисту від перенапруг і грозових імпульсів, а також застосовувати якісні пускові апарати [7]. Правильна електромонтажна практика (надійне затягування клем, захист шаф від вологи і пилу, регулярна перевірка ізоляції) значно підвищує живучість насосного електродвигуна і знижує імовірність раптового відмовлення.

Експлуатаційні та організаційні чинники

До цієї категорії відносять причини відмов, пов'язані з людським фактором, неправильним вибором чи використанням обладнання, а також недотриманням режимів обслуговування. Порушення правил експлуатації може проявлятися у вигляді роботи насоса в неприпустимому режимі (наприклад, «суха» робота без води, часті пуски/зупинки, робота далеко від оптимальної точки) – усе це підвищує навантаження на вузли та прискорює їх знос. Неналежне технічне обслуговування є ще одним поширеним фактором: несвоєчасна заміна зношених деталей, ігнорування планових оглядів і ремонту призводять до накопичення прихованих дефектів, які зрештою спричиняють аварійний вихід насоса з ладу.

Досвід показує, що на практиці експлуатаційні недоліки суттєво знижують надійність насосних станцій. Українські фахівці зазначають, що багато агропідприємств не дотримуються регламентів експлуатації насосного обладнання: затягують з проведенням капітальних ремонтів, використовують неоригінальні запасні частини, а подекуди й експлуатують насоси не за призначенням чи в невідповідних умовах [8]. За таких умов навіть якісне обладнання виходить з ладу передчасно. Згідно з даними наукових досліджень, забезпечити високу надійність насосів для систем зрошення можна лише за умови тісної співпраці виробника обладнання та експлуатуючої організації – зокрема, дотримання рекомендованих інтервалів сервісного обслуговування і використання запчастин належної якості [8].

Неправильний монтаж і зовнішні впливители входять до експлуатаційних причин відмов. За оцінками, до 8% поломок спричинені помилками при встановленні насосів або дією сторонніх предметів, що потрапили всередину (наприклад, сміття, каміння) [1]. Такі інциденти можуть призвести як до механічних пошкоджень (заклинювання крильчатки, поломка лопатей чи вала), так і до аварій електродвигуна.

Підвищити надійність експлуатації насосів у зрошувальних системах дозволяє впровадження сучасних підходів до обслуговування. Зарубіжні дослідження рекомендують перехід від реагуючого ремонту до превентивного і умовно-профілактичного технічного обслуговування. Так, аналіз роботи зрошувальних насосів показав, що стандартні фіксовані графіки ремонту не забезпечують потрібної надійності; натомість використання статистичних моделей для оцінки стану насоса та планування ремонту за фактичним станом дозволяє оптимізувати інтервали обслуговування і запобігти катастрофічним відмовам [9]. Іншими словами, регулярний моніторинг (в тому числі вібраційний і температурний

контроль), планова заміна критично зношених компонентів і своєчасне реагування на перші симптоми несправностей – ключові заходи, що сприяють безвідмовній роботі насосів у системах зрошення [9].

Результати досліджень довговічності та ресурсу

З початку XXI століття проведено багато наукових досліджень, присвячених надійності насосів для зрошення, в тому числі в умовах закритого ґрунту. Зокрема, польові обстеження та опитування фермерів дозволили оцінити фактичний ресурс роботи насосного обладнання. На основі даних досліджень було встановлено середній термін служби основних компонентів сільськогосподарських насосів (таблиця 2): підшипники – близько 3,6 років, сальники (ущільнення) – $\sim 3,2$ р., робоче колесо – $\sim 3,6$ р., вал – $\sim 4,2$ р., корпус – $\sim 4,6$ р. [3].

Таблиця 2

Термін служби компонентів відцентрового насоса системи зрошування, років [3]

Компоненти	Середній наробіток на відмову, років	Стандартне відхилення
Підшипник	3.56	0.635
Сальник	3.18	0.622
Робоче колесо	3.61	0.515
Вал	4.20	0.608
Корпус	4.64	0.573

Найчастішими проблемами, з якими стикалися аграрії, були протікання і надмірний шум насоса – ці несправності виникали в середньому кожні $\sim 3,1 - 3,2$ роки. Така відносно невелика довговічність пояснюється важкими умовами експлуатації (нечиста вода, робота “насухо” при спустошенні джерела, відсутність регулярного ремонту). Отже, ресурс роботи насоса в зрошувальній системі часто вичерпується за 3 – 5 років без капітального ремонту, якщо не вживати додаткових заходів для підвищення довговічності.

Чисельні лабораторні дослідження фокусуються на окремих механізмах зносу, щоб знайти шляхи їх мінімізації. Прикладом, експериментальні випробування на насосах великої зрошувальної станції в Узбекистані показали, що нерівномірний підвід води до паралельних насосних агрегатів призводив до зворотних потоків у крайніх насосах, вібрацій та кавітації. Після модернізації всмоктувальної системи і конструкції робочого колеса (усунення зони кавітації на вході) вдалося знизити рівень кавітації, зменшити вібрацію та підвищити основні показники роботи насосів [10]. У результаті на модернізованих агрегатах зріс ресурс – підвищилася їхня надійність та довговічність за рахунок усунення головних чинників пошкоджень.

Низка робіт приділена ерозійному зносу за впливу твердих домішок і кавітації. Так, в [11] дослідили динаміку спрацьовування деталей насосів за несталих кавітаційних режимах і наявності піщаних часток у воді. Вони рекомендують контролювати розмір твердих часток у системі (наприклад, використовуючи фільтри) та уникати режимів, що провокують кавітацію, оскільки ці фактори суттєво впливають на швидкість ерозії робочих органів (таблиця 3).

Таблиця 3

Коефіцієнти відносної зносостійкості робочих коліс [11]

Кількість випробуваних робочих коліс, шт	Розміри домішок, мм	Концентрація домішок, %	Середнє значення наробітку на відмову (MTBF), год	Коефіцієнт зносостійкості
8	2 – 5	15 – 20	560 – 610	2,3 – 3,05
4	0,5 – 2	20 – 23	620 – 710	2,7 – 3,1

Ще одне дослідження за допомогою комп’ютерного моделювання підтвердило, що більші

та кутуваті (несферичні) частки викликають сильніше спрацювання проточних частин насоса, причому знос зосереджується в основному на вхідних крайках лопаток робочого колеса і напрямних апаратів. При зростанні дебіту насоса зона зносу розширюється і пошкодження поглиблюються [12]. Це пояснює, чому в системах крапельного поливу з рециркуляцією поживних розчинів (тепличні господарства) дуже важливе очищення води від твердих домішок і контроль гідравлічних режимів.

В роботі [1], опубліковано огляд присвячений підвищенню ефективності та ресурсу роботи відцентрових насосів. В цьому огляді узагальнено сучасні підходи до продовження строку служби насосів: оптимізація конструкції за допомогою моделювання (включно з використанням масштабних моделей і цифрових двійників) та застосування захисних покриттів для підвищення зносостійкості деталей. Зокрема, зазначено важливу роль зміцнювальних покриттів – впровадження інноваційних технологій напилення чи облицювання істотно підвищує стійкість проти абразивного зносу робочих коліс, корпусів та валів насосів. У цьому ж дослідженні наголошується, що знос поверхонь (від тертя та корозії) призводить до деградації їх механічних властивостей – втрачається пружність, міцність, що зрештою прискорює виникнення тріщин і поломок.

Базовим кроком до високого ресурсу є грамотний підбір насосного обладнання під конкретні умови роботи. Рекомендовано обирати тип і модель насоса, що забезпечуватиме необхідну подачу при роботі поблизу оптимальної точки (максимального КПД), зі значним запасом по кавітації. Надто високооборотні або перевантажені насоси швидше виходять з ладу. Як зазначено в [13], тривала безвідмовна робота можлива, якщо насос працює в межах допусків проєктного режиму – навіть надійно спроектовані агрегати погано переносять тривалу роботу з відхиленнями, адже внутрішні рециркуляції спричиняють нестабільність, вібрації та знос. Тому уникнення кавітації і режимів з внутрішньою рециркуляцією – ключова умова довговічності (досягається правильним монтажем, достатнім рівнем води у приймальному резервуарі, очищенням фільтрів, роботою при відкритих засувках на напірній лінії і т. ін.) [13].

Науковці приділяють увагу модернізації насосів для важких умов зрошення. В уже згаданому дослідженні [10], усунення кавітаційного осередку на вході робочого колеса значно підвищило ресурс насоса. Інші роботи пропонують застосування спеціальних матеріалів і покриттів: наприклад, імперери з полімерних композитів або з керамічними накладками стійкіші до абразиву; наплавлення зносостійких сплавів або нанесення керамічних/карбідних покриттів на найбільш навантажені зони (крайки лопаток, гільза вала, посадочні місця підшипників) значно подовжує строк служби деталей. У насосах для агресивних добривах розчинів застосовують корозійностійкі сплави та герметичні безсальникові конструкції (магнітні приводи тощо) для підвищення надійності. Крім того, демпфери вібрацій та вдосконалені опори вала знижують динамічні навантаження: сучасні віброзахисні системи з гістерезисними властивостями пружних елементів успішно впроваджуються на насосних агрегатах, зменшуючи рівень вібрацій і ризик аварії [10].

Регулярний технічний огляд і обслуговування – обов'язкова умова підтримання ресурсу насосів. У сільськогосподарській практиці часто відмови стаються через невчасне виявлення проблем (перегрів підшипника, зношення ущільнення тощо). Сучасні підходи рекомендують впроваджувати моніторинг стану насоса. Наприклад, встановлення датчиків вібрації, тиску та рівня може виявити початок несправності до катастрофічної відмови. Зарубіжні фахівці зазначають, що більшість насосів на виробництві працюють без постійного моніторингу, але запровадження хоча б базових систем сильно підвищує вірогідність раннього виявлення проблем і запобігання поломкам. Вібраційна діагностика дозволяє за спектром вібрацій розпізнати зародження пошкоджень підшипників, дисбаланс ротора, кавітацію чи нерівності крильчатки. У 2025 р. група дослідників запропонувала модель оцінки довговічності насоса на основі аналізу вібрацій – вона дає змогу передбачити розвиток дефекту і виконати ремонт превентивно [14]. Такі прогностичні підходи впроваджуються на практиці: зокрема,

контроль стану торцевих ущільнень за витоком і тиском у системі промивання може завчасно сигналізувати про спрацювання ущільнення і потребу його заміни. Отже, перехід від реагування на поломку до її попередження суттєво збільшує ресурс роботи насосів.

Хоча значна частина публікацій належить іноземним авторам, українські вчені також активно досліджують проблему ресурсу насосів у тепличному господарстві. Так, в [15] було проведено аналіз технічного стану компонентів систем поливу рослин захищеного ґрунту та типових відмов відцентрових насосів. Вони класифікували види несправностей насосних агрегатів при тепличному зрошенні та виявили, які вузли найчастіше виходять з ладу в умовах закритого ґрунту. На основі цих даних були запропоновані рекомендації щодо покращення надійності – зокрема, заходи з фільтрації води, регламенти обслуговування та оптимальні режими роботи насосів. У роботі [16] розроблено інженерні рішення для збільшення ресурсу насосів тепличних господарств – йдеться про вдосконалення конструкції проточних частин та застосування більш зносостійких матеріалів для деталей, що контактують з поливною водою. Крім того, українські вчені публікують результати у фахових журналах: наприклад, у згаданому огляді [1] розглядається досвід впровадження на підприємствах України сучасних покриттів і технологій ремонту насосів для підвищення їхнього ресурсу. Це підкреслює, що тема надійності насосного обладнання є актуальною і для української науки та практики.

Висновки

Відцентрові насоси є критичним елементом зрошувальних систем у захищеному ґрунті, від надійності та довговічності яких залежить ефективність роботи тепличних господарств. Проведений аналіз показав, що на ресурс насосного обладнання впливають численні фактори, які поділяються на чотири основні групи: механічні, гідравлічні, електричні та експлуатаційні.

До основних механічних причин відмов належать знос підшипників, ущільнень, валів, а також вібрації та резонансні навантаження, що виникають унаслідок неправильного монтажу, розбалансування ротора чи абразивного зносу. Гідравлічні відмови пов'язані з кавітацією, пульсаціями тиску, гідроударами та ерозією проточних частин насоса через домішки у воді. Електричні проблемистосуються якості живлення – перенапруг, перекосів фаз, поганих контактів – що призводить до перегріву і виходу з ладу електродвигунів. Нарешті, експлуатаційні чинники включають порушення режимів роботи (часті пуски, «сухий хід»), відсутність планового обслуговування, використання неякісних запчастин і фільтрації.

Згідно з польовими обстеженнями, фактичний ресурс основних вузлів насосів без капремонту становить лише 3 – 5 років. Найчастіші несправності – це протікання, шум, вібрації та перегрів. Разом з тим, результати сучасних досліджень (як українських, так і іноземних) показують можливості значного подовження ресурсу агрегатів шляхом:

- оптимізації гідравлічного профілю насосів для уникнення кавітації;
- застосування зносостійких і корозійностійких матеріалів;
- впровадження сучасних методів діагностики (віброконтроль, датчики тиску/температури);
- організації профілактичного (а не реактивного) обслуговування.

В умовах захищеного ґрунту, де системи працюють у складному мікрокліматичному середовищі (підвищена вологість, агресивні домішки, циклічні навантаження), ці заходи набувають особливої ваги. Практичні рекомендації, що випливають з аналізу, мають важливе значення як для розробників насосного обладнання, так і для агровиробників, які експлуатують зрошувальні системи в теплицях.

Таким чином, забезпечення довговічності відцентрових насосів можливе лише за умови інтегрованого підходу – поєднання конструктивних, експлуатаційних, технологічних і організаційних рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Morshch I. V. Analysis of the causes of damage to centrifugal pumps during operation and methods of their elimination. *Problems of Tribology*. Kyiv Aviation Institute, Ukraine. 2025. V. 30, №1/115-2025. P. 60–65.
2. A review of major centrifugal pump failure modes with application to the water supply and sewerage industries / K. K. McKee et al. *ICOMS Asset Management Conference*. May 16 2011. Gold Coast, QLD, Australia: Asset Management Council. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/A-review-of-major-centrifugal-pump-failure-modes-to-McKee-Forbes/77954c188a7fadd0c0d74b6b8a61bf364cdc2cb7>.
3. Er. Amit Kumar, Er. Anurag Singh, Dr. Raj Mani Maurya. Assessment of Mechanical Problems for Centrifugal Pumps in Eastern Uttar Pradesh, India. *International Journal of Advanced Engineering, Management and Science* Sept-2018. Vol. 4, Issue 9. P. 686–689.
4. Robby Byrom, Gary Dyson. Irrigation Pumps Fail in Dire Drought Conditions. *Pumps & Systems* – 2019. URL: <https://www.pumpsandsystems.com/irrigation-pumps-fail-dire-drought-conditions#:~:text=of%20vibration%20that%20led%20to,the%20pump's%20parts%20to%20the>.
5. Sediment erosion in the impeller of a double-suction centrifugal pump / Z. Shen et al. *A case study of the Jingtai Yellow River Irrigation Project*. China. 2019. P. 422–423.
6. Mutisi K. Why Does My Irrigation Pump Keep Failing? *Sollatec*. 2024. URL: <https://www.sollatec.com/why-does-my-irrigation-pump-keep-failing>.
7. Mike Morris, Vicki Lynne. Maintaining Irrigation Pumps, Motors, and Engines. *ATTRA, NCAT Agriculture Specialists*, 2006. URL: <https://attra.ncat.org/wp-content/uploads/2022/10/maintaining-irrigation-pumps-motors-engines.pdf>.
8. Борисюк М. А. Дослідження надійності відцентрових насосів систем крапельного зрошування : кваліфікаційна робота. Поліський національний університет, Житомир, 2023. 50 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/13898/1/Borysiuk_MA_208_2023.pdf.
9. Mohamed Yagoub Adam, Hassan Khalifa Osman, M. I. Shukri. Analysis of Major Centrifugal Pumps Failures (With Application to Irrigation Pumps in Sudan). *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*. March-April-2021. Volume 7, Issue 2. P. 632–639.
10. Experimental and theoretical studies of pumps of irrigation pumping stations / O. Glovatskiy et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol 263, 02030. P. 10.
11. Erosion processes during non-stationary cavitation of irrigation pumps / A. Dzhurabekov et al. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol 264, 03016. P. 9.
12. Study on Wear Characteristics of a Guide Vane Centrifugal Pump Based on CFD–DEM / W. Cao et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. №12 (4). P. 593–609.
13. Sahoo T. Making centrifugal pumps more reliable. *World Pumps*, June 2009. P. 32–35.
14. Modernization of submersible pump designs for sustainable irrigation: a bibliometric and experimental contribution to sustainable development goals (SDGS) / O. Glovatskiy et al. *Indonesian Journal of Science & Technology*. June 2025. Vol. 10, №3. P. 427–438.
15. Міненко С. В., Савченко В. М., Махов О. А. Аналіз технічного стану складових систем зрошування рослин в умовах захищеного ґрунту. *Матеріали науково-практ. конф. Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2019. Вип. 198, С. 429–435.
16. Яненко Є. О. Підвищення довговічності робочих органів відцентрових насосів в умовах вирощування продукції рослинництва захищеного ґрунту. кваліфікаційна робота, Житомирський національний агроекологічний університет, 2020. 30 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/10622/1/Yanenko_YO_KR_208_2020.pdf.

Стаття надійшла до редакції 21.07.2025.

Стаття пройшла рецензування 17.09.2025.

Махов Олександр Андрійович – аспірант, кафедра механічної інженерії та технологій, машинобудування, e-mail: zt.tiva@gmail.com.
Поліський національний університет.