

**В.Р. Кулінченко, доктор техн. наук,
О.М. Деменнюк і О.П. Ломейко, канд. техн. наук
V.R. Kulintchenko, doctor of tech. sciences,
O.M. Demeniuk and O.P. Lomeiko, cand. of tech. sciences**

КОНСТРУЮВАННЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЖЕКЦІЙНИХ НАСОСІВ.

8. ПРИНЦИПОВІ СХЕМИ УСТАНОВОК І МЕТОДИКИ ЇХ РОЗРАХУНКУ

CONSTRUCTING OF PUMPINGS OPTIONS IS WITH THE USE OF EZHEKCIYNIKH OF PUMPS.

8. OF PRINCIPLE CHARTS OF OPTIONS AND METHOD OF THEIR CALCULATION

Розглядаються різні варіанти типових схем сумісної роботи відцентрових і струминних насосів, які дозволяють поліпшити технологічні показники як відцентрових так і струминних насосів.

Ключові слова: схеми установок; токсичні, абразивні, корозійні, забруднені рідини; методика розрахунку

The different variants of typical charts of compatible work of centrifugal and stream pumps which allow to improve technological indexes as so stream chempumps are examined.

Keywords: cxesmes options; toxic, abrasive, corrosive, liquids are muddy; method of calculation

Принципові схеми установок. Сумісне використання гідроструминних і лопатевих насосів дозволяє створити широке розмаїття автономних установок різного призначення, які суттєво збільшують можливості використання насосів. При сумісному використанні з іншими типами насосів гідроструминні апарати дозволяють:

- відкачувати рідину відцентровими насосами, розташованими на поверхні землі, з глибоких шахт, свердловин і колодязів;
- збільшувати допустиму висоту всмоктування відцентрових насосів (збільшувати кавітаційний запас) під час роботи їх на гарячих, перегрітих і легко киплячих рідинах;
- транспортувати із важкодоступних місць корозійні, абразивні токсичні і інші забруднені рідини;
- змінювати у широких межах робочі і кавітаційні характеристики відцентрових, вихрових і інших типів насосів (збільшувати у разі необхідності створюваний насосами напір чи подачу);
- здійснювати вакуумний водовідвід і водопониження як на будівництві, так і при постійному дренаванні споруд;
- відкачувати повітря із всмоктувальних трубопроводів і внутрішніх порожнин насосів, які самі не можуть всмоктувати рідини при їх пуску, а також постійно підтримувати насоси під заливом у стані готовності до пуску;
- змішувати між собою і розчиняти різні рідини, гази і тверді речовини;
- отримувати стисле повітря (струминні гідрокомпресори) та ін.

На рис.1 наведені схеми деяких установок з лопатними і гідроструминними насосами. Установка, наведена на рис.1,а, призначена для відкачування рідин з великої глибини відцентровим насосом, який розташовано на поверхні землі. Відцентровий насос 2 подає рідину в посудину 1 і далі споживачу чи на скидання. Одночасно частина рідини подається по відгалуженню від напірного трубопроводу насоса в сопло гідроструминного насоса 3, яке розташовано під шаром відкачуваної рідини, чи на певній висоті відносно її поверхні. Коли робоча рідина проходить через сопло гідроструминного насоса, вона підсмоктує рідину з джерела (резервуара) 4 і подає її у всмоктувальний патрубок відцентрового насоса. У подальшому цикл роботи повторюється.

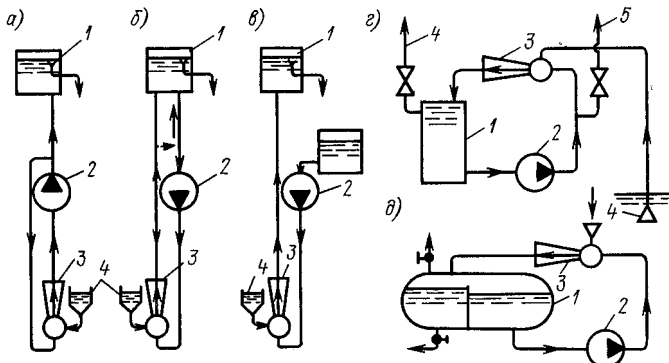


Рис.1. Приклади схем установок з гідроструминними і лопатевими насосами

Таким чином, гідроструминний насос у цій установці виконує роль бустера (від англійського boost – підіймати, підвищувати тиск), який приводиться в дію струменем робочої рідини, створюваним відцентровим насосом. Тому що частина витрат рідини, яка перекачується відцентровим насосом, постійно циркулює через гідроструминний насос, то подача рідини у посудину 1 менше подачі насоса. Але це дозволяє збільшити загальний напір установки і підіймати рідину з глибини, яка у декілька разів перевищує допустиму вакуумметричну висоту всмоктування відцентрового насоса 2.

Установка, схема якої наведена на рис.1,б, також призначена для відкачування рідини насосом, який розміщений на поверхні землі, з глибини, що перевищує вакуумметричну висоту всмоктування відцентрового насоса. Відмінність цієї установки від установки на рис.1,а криється у схемі підключення насоса 2. У даному випадку цей насос всмоктувальним патрубком підключений до баку 1. Усі витрати рідини, які перекачуються насосом 2, підводяться до робочого сопла гідроструминного насоса 3. Гідроструминний насос підсмоктує рідину з резервуара 4 і подає сумарний потік у бак 1. З цього бака частина витрат рідини йде до споживача, а інша частина повертається на циркуляцію в насос 2. Всмоктувальний трубопровід відцентрового насоса 2 і нагнітальний трубопровід від гідроструминного насоса 3 можна з'єднати між собою. Тоді нагнітальний трубопровід до бака стає непотрібним. Циркуляційні витрати рідини будуть відразу повертатися до відцентрового насоса.

Установка на рис.1,в призначена для відкачування токсичних чи агресивних рідин з великої глибини з важкодоступних місць. У зв'язку з тим, що після змішування з робочою рідиною, яка подається насосом 2, з рідиною, що відкачується гідроструминним насосом 3 з резервуара 4, суміш також стає токсичною (агресивною), циркуляція рідини в установці не передбачена, і вся рідина спрямовується у резервуар 1.

Установки наведені на рис.1,б,в можуть використовуватися при водопониженні з ежекторними голчатими фільтрами [1]. У цьому разі гідроструминний насос (ежектор) є конструктивною частиною голчатого фільтра, зануреного в ґрунт на необхідну глибину. За допомогою ежектора у ґрунті створюється вакуум, який сприяє інтенсивній відкачці води. У процесі пониження рівня води з ґрунту в голчатий фільтр починає відсмоктуватися повітря. Тому використовувати установку за рис.1,а для водопониження у сполученні з голчатыми фільтрами не можна, тому що повітря, яке потрапляє з ежектора 3 у відцентровий насос 2, може викликати зрив його роботи і виникненню у системі нестационарного процесу (гідравлічного удару). Для запобігання потрапляння повітря до відцентрового насоса між ним і гідроструминним насосом можна ставити розподільчу посудину.

Установка, схема якої наведена на рис.1,г, може виконувати ряд функцій. Перед усім вона може використовуватися як вакуумна водовідливна установка. Під час роботи насоса 2 він забирає рідину з посудини 1 і подає її до робочого сопла гідроструминного насоса 3. Гідроструминний насос створює необхідне для всмоктування рідини з джерела 4 розрідження. Відсмоктування гідроструминним насосом рідина разом з робочою подається в бак 1. Рідину з системи можна відводити двома способами.

У першому з них рідина після наповнення бака 1 буде відводитися трубопроводом 4. При цьому тиск у трубопроводі 4 дорівнює тиску, який створюється гідроструминним апаратом 3. Цей тиск передається у всмоктувальний патрубок насоса 2, внаслідок чого збільшується тиск біля сопла гідроструминного насоса 3 і, як наслідок, покращуються умови праці гідроструминного насоса у порівнянні з його установкою у відкритій (без циркуляційній) схемі.

Другим способом подачі (видалення) рідини з системи є транспортування її трубопроводом 5. У цьому випадку рідина з системи буде відводитися з більш високим

тиском, ніж у першому випадку. Тиск у трубопроводі 5 складається з тиску, створюваного насосом 2, і тиску, який виникає в посудині 1 за рахунок роботи гідроструминного насоса. Але цей вигравш у тиску призводить до зменшення подачі рідини установкою. На відміну від першого випадку, через робоче сопло струминного апарата проходить не вся подача насоса 2, а тільки її частина, тому що певна кількість рідини відводиться трубопроводом 5.

Відмічені особливості роботи установки дозволяють використовувати її як перетворювач характеристики відцентрового насоса (рис.1,з). При відведенні витрат трубопроводом 4 подача агрегата може перевищувати кількість рідини, що проходить через насос 2. Це буде мати місце при коефіцієнті підсмоктування гідроструминного апарата $u > 1$. Тиск у напірному трубопроводі 4 буде меншим тиску, створюваного насосом 2, на величину витрат у гідроструминному насосі 3. Далі покажемо, що за малих відносних витрат, коли повна подача агрегата $Q_{нов} < 0,1Q_{нас}$ (де $Q_{нас}$ – подача насоса), тиск, створований агрегатом, перевищує тиск насоса. При $Q_{нов} / Q_{нас} \rightarrow 0$ відношення тисків становить $p_{нов} / p_{нас} \approx 2,2$. У той же час, якщо відводити рідину трубопроводом 5, то тиск у цьому трубопроводі буде більшим, ніж створюється насосом 2, на величину підпору у посудині 1.

У схемі перетворювача (рис.1,з) не обов'язково мати у наявності посудину 1. Установка цієї посудини тільки збільшує стійкість роботи агрегата при коливаннях витрат у джерелі живлення чи у споживача. Установки зібрані за схемою рис.1,з можуть працювати не тільки при перекачуванні (відкачуванні) рідин. Їх можна використовувати також як вакуумні установки для відкачування повітря (газу) [2]. У цьому випадку трубопровід 4 необхідно з'єднати з атмосферою, а всмоктувальний патрубок гідроструминного апарата приєднати до об'єкту, у якому необхідно створювати вакуум. Відкачуване повітря буде разом з рідиною надходити у посуд 1, де відокремлюється від нього, виходить в атмосферу.

У вакуумних водовідливних установках зібраних по схемі рис.1,з [3] інколи монтують паралельно два гідроструминних апарата 3. Один з них відкачує рідину (воду), другий – повітря (газ).

Установка зображена на рис.1,д, представляє собою гідрокомпресор струминного типу. Вона працює аналогічно попередній. Відмінність криється у тому, що гідроструминний апарат 3 стискає повітря в посудині 1 до заданого тиску і подає його споживачу. Не дивлячись на те що струминні гідрокомпресори мають більш низький ККД, ніж поршневі, шестеренні і інші типи компресорних машин, вони більш надійні у роботі, створюють значно менше шуму. Крім цього, повітря що подається ними у певній мірі очищається під час контакту з водою і не містить нафтопродуктів, які у механічних компресорах виносяться від деталей, які змащуються.

Велике розмаїття схем установок з гідроструминними і відцентровими насосами, які використовуються і можуть бути використані на практиці, можна звести до декількох принципових схем.

У схемах, зображених на рис.2,а,б, корисна подача відбирається після гідроструминного насоса 3 із циркуляційного бака 2. У схемі з циркуляційним баком установка може перекачувати не тільки рідину, але й газ (повітря), тобто працювати у режимі струминного вакуум-насоса чи струминного компресора. У цьому випадку баки 1 і 4 необхідно замінити на інше обладнання (наприклад, ресиверами). Схема на рис.2,б відрізняється від схеми на рис.2,а тим, що в ній гідроструминний насос 3 розташований на відносно більш низьких геодезичних відмітках, ніж насос 5. Тому схема на рис.2,б відповідає установкам для подачі рідини з великої глибини, насос в яких розташований на поверхні землі (рис.1,б). Схема на рис.2,а відповідає установці (рис.1,з) при відборі рідини з циркуляційного бака трубопроводом 4.

У схемах на рис.2,в,г відбір корисної подачі відбувається перед гідроструминним насосом (після відцентрового насоса). Схема на рис.2,в відповідає установці з відбором корисних витрат рідини трубопроводом 5 (рис.1,з), а схема на рис.2,г – установці для підіймання рідин з великих глибин (рис.1,а). Варто відмітити, що установки, які виконані за схемами на рис.2,в,г, не можуть працювати на газі (повітрі) навіть при наявності циркуляційного бака 2. Це пояснюється тим, що середовище яке відбирається з системи повинно проходити через відцентровий насос.

Установки ж з циркуляційним баком, які виконані за схемами на рис.2,а,б, можуть працювати і після повної відкачки рідини з приймальної посудини 4. У цьому випадку гідроструминний апарат відсмоктує повітря і подає його в циркуляційний бак 2 і далі на викид. При поновленні подачі рідини у приймальну посудину установка дозволяє продовжувати її відкачування. В установках за схемами на рис.2,в,г така робота можлива тільки у тому випадку, якщо на період припинення притоку рідини у приймальну посудину 4 подача рідини в бак 1 буде припинена. Це може бути виконано, наприклад, з допомогою перекриття відповідного трубопроводу засувкою з автоматичним приводом чи поплавковим клапаном, який ставиться у циркуляційному баку.

У тих випадках, коли циркуляційна установка призначена тільки для перетворення робочих чи кавітаційних характеристик відцентрових насосів (збільшення корисної подачі чи корисного напору, збільшення кавітаційного запасу), наявність циркуляційного баку у системі є необов'язковим. Схеми таких установок з гідроструминними насосами для перетворення характеристик відцентрових (а також інших типів) насосів наведено на рис.3.

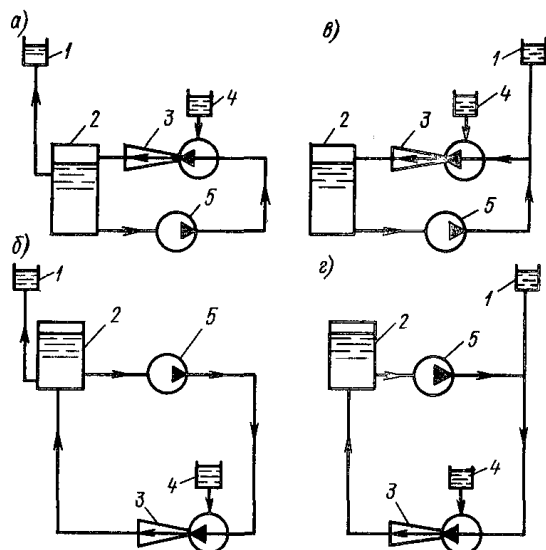


Рис.2. Принципові схеми циркуляційних установок з гідроструминними і лопатевими насосами:
 а, б – з відбором корисних витрат рідини після струминного насоса; в, г – з відбором корисних витрат рідини до струминного насоса; 1 – бак споживача; 2 – циркуляційний бак; 3 – гідроструминний насос; 4 – джерело рідини (приймальна посудина установки); 5 – відцентровий насос

Установки, наведені на рис.3,а,б (з відбором рідини після струминного насоса) дозволяють збільшити корисну подачу $Q_{кор}$ у порівнянні з подачею відцентрового насоса $Q_{нас}$, а установки з відбором рідини до струминного (після відцентрового) насоса (рис.3,в,г) дають можливість збільшувати корисний напір у порівнянні з напором відцентрового насоса.

Розглянемо інші можливі випадки принципових схем установок з гідроструминними і відцентровими насосами (рис.4).

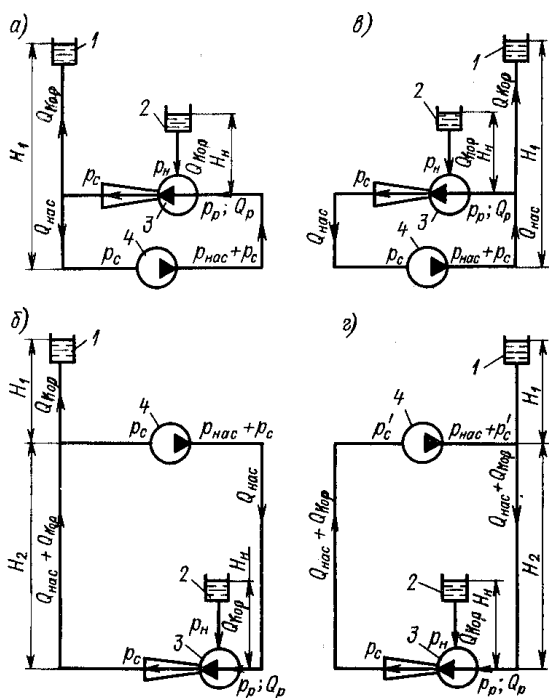


Рис.3. Принципові схеми установок для перетворення $H - Q$ характеристик відцентрових насосів: а, б – з відбором корисних витрат рідини після струминного насоса; в, г – з відбором корисних витрат рідини до струминного насоса; 1 – посудина споживача рідини; 2 – приймальний посуд установки; 3 – гідроструминний насос; 4 – відцентровий насос

Схема на рис.4,а в основному призначена для перекачування забруднених рідин [4]. Рідина, яка містить тверді домішки, подається до правої частини приймальної посудини 1. Звідси вона проходить до лівої секції, відокремленої від правої фільтром, наприклад сіткою. Під час роботи установки відцентровий насос 2 забирає відносно чисту рідину з лівої секції приймальної посудини 1 і подає її в робоче сопло гідроструминного насоса 3, який забирає забруднену рідину з правої частини посудини 1. Цим самим не допускається забруднення відцентрового насоса.

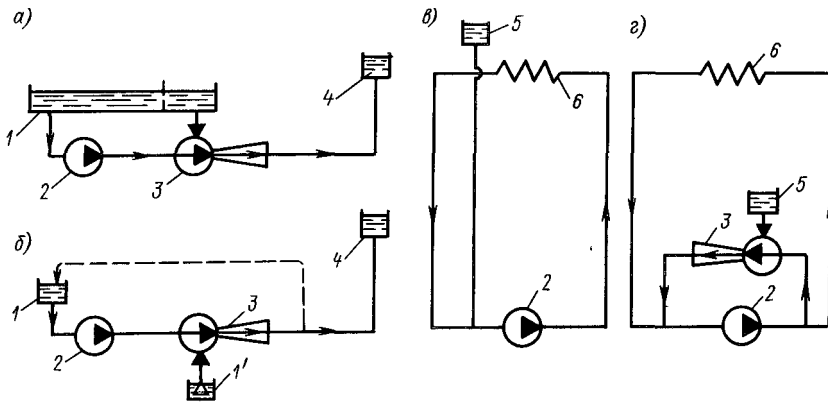


Рис.4. Варіанти принципів схем установок з гідроструминними і відцентровими насосами: а – схема двоструминної насосної установки; б – схема установки для гідралічного транспортування твердих матеріалів; в – циркуляційна схема охолодження обладнання; г – циркуляційна схема охолодження обладнання з гідроструминним бустерним

насосом; 1, 1' – приймальні посудини; 2 – відцентровий насос; 3 – гідроструминний насос; 4 – посудина споживача рідини; 5 – бак-розширювач; 6 – технологічне обладнання

Крім цього, сумісне використання відцентрового і гідроструминного насосів збільшує корисну подачу установки, яка складається з подачі відцентрового насоса $Q_{нас}$ і гідроструминного $uQ_{нас}$ насосів, тобто $Q_{нов} = (1 + u)Q_{нас}$.

На рис.4,б наведена схема установки для гідротранспорту твердих речовин. Принцип дії цієї установки аналогічний установці, зображеній на рис.4,а. Відцентровий насос 2 забирає з резервуара 1 робочу рідину і подає її в робоче сопло гідроструминного насоса 3. Останній підсмоктує гідросуміш з резервуара 1' (резервуаром 1' може служити завантажувальний бункер, який здійснює сухе завантаження твердої речовини) і подає її до споживача 4. У деяких випадках частина робочої рідини після відокремлення від неї твердих речовин може повертатися до приймальної посудини 1 для повторного використання, зворотний трубопровід показаний на рис.4,б штриховою лінією.

На рис.4,в,г для порівняння наведені дві схеми циркуляційних систем, призначених, наприклад, для охолодження технологічного обладнання.

Схема на рис.4,в є традиційною. Бак-розширювач 5 призначений для компенсації температурних деформацій викликаних рідиною, що циркулює в системі, а також для підтримання на вході в насос необхідного надкавітаційного напору. Для усунення кавітації бак-розширювач 5 повинен ставитися на достатньо високій геодезичній відмітці у порівнянні з насосом 2, що не завжди можливо, наприклад у суднових і інших умовах.

Схема, наведена на рис.4,г, ліквідує названий недолік. У цьому випадку бак-розширювач 5 установлений на всмоктувальному патрубку гідроструминного насоса 3, який включений у розрив трубопроводу, що сполучає напірний і всмоктувальний патрубки насоса 2. Гідроструминний насос 3, який забирає у початковий період роботи невелику кількість рідини з бака-розширювача 5 і нагнітає її у замкнену систему, збільшує тиск на всмоктуванні насоса 2 (а значить і у всій системі) до необхідної величини. При цьому бак-розширювач можна розміщувати на більш низьких геодезичних відмітках, ніж у схемі, наведеній на рис.4,в.

Методика розрахунку і основні показники циркуляційних установок з гідроструминними і лопатевими насосами. Параметри установок з гідроструминними і лопатевими насосами залежать від гідралічних характеристик. Гідравлічні характеристики насосів, а також з'єднувальних їх трубопроводів і інших конструктивних елементів гідросистем описуються нелінійними рівняннями. Розв'язок системи рівнянь, які описують гідралічні характеристики, можна отримати чисельними методами з використанням персональних комп'ютерів. Розв'язок суттєво ускладнюється необхідністю урахування можливості виникнення кавітації у гідроструминних насосах. Це вимагає під час рішення замість рівнянь нормальних гідралічних характеристик струминних насосів використати їх окремі кавітаційні характеристики. Для спрощення розрахунків установок можна використати нормальні і окремі гідралічні характеристики гідроструминних насосів. Можна показати, що схеми установок, наведені на рис.3,б,г, є загальним випадком циркуляційних установок з гідроструминними і лопатевими насосами. Дійсно, приймаючи на рис.3,б,г $H_2 = 0$, отримаємо схеми установок, зображених на рис.3,а,в. Для аналізу параметрів названих установок нанесемо на їх схеми розподіл тисків і витрат рідини (рис.5)

Для спрощення аналізу на першому етапі розрахунку можна не враховувати втрати напору в елементах з'єднання установок. За конкретних умов можна так вибрати розміри трубопроводів (діаметри), що гідравлічні опори будуть на багато меншими тиску, створюваного відцентровим насосом і установкою. У необхідних випадках гідравлічні опори можна врахувати на кінцевих етапах розрахунку.

Розглянемо розподіл тисків і витрат в елементах установок, наведених на рис.5.

В установці з відбором корисних витрат рідини $Q_{кор}$ після гідроструминного насоса (рис.5,а) цей насос створює на виході надлишковий тиск, рівний сумі тисків $p_1 = \rho g H_1$ і $p_2 = \rho g H_2$. Абсолютний тиск на виході з гідроструминного насоса в МПа становить:

$$p_c = p_1 + p_2 + 0,1. \quad (1)$$

На вході до відцентрового насоса надлишковий тиск $p_1 = \rho g H_1$. На виході з цього насоса надлишковий тиск становить $p_1 + p_{нас}$, де $p_{нас}$ – надлишковий тиск, створюваний насосом. Абсолютний тиск біля робочого сопла гідроструминного насоса можна визначити за формулою в МПа:

$$p_p = p_{нас} + (p_1 + p_2 + 0,1), \quad (2)$$

чи з урахуванням виразу (1)

$$p_p = p_{нас} + p_c. \quad (3)$$

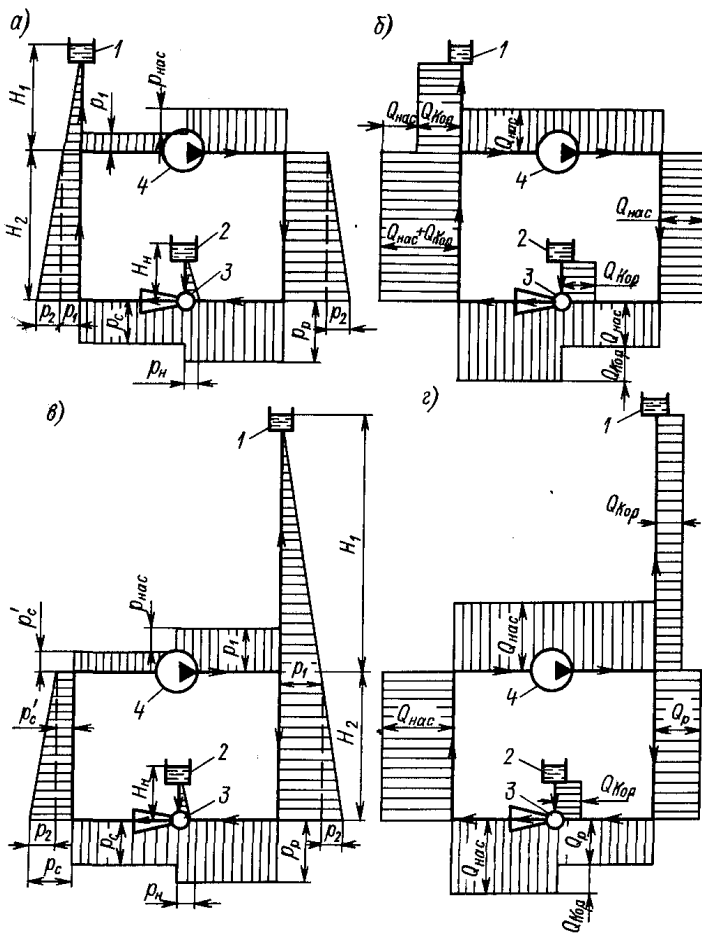


Рис.5. Розподіл тисків і витрат рідини в установках з гідроструминними і лопатевими насосами: а, б – за умови відбору рідини після струминного насоса; в, г – за умови відбору рідини до струминного насоса; 1 – посудина споживача рідини; 2 – приймальний бак установки; 3 – гідроструминний насос; 4 – відцентровий насос

Тиск на всмоктуванні гідроструминного насоса визначається рівнем розташування рідини відносно осі струминного апарата H_n (рис.5,а). Величина H_n може бути додатною (якщо рівень рідини розташований вище осі насоса) чи від'ємною (під час роботи гідроструминного насоса на всмоктування). Тому абсолютний тиск на всмоктуванні можна визначити за формулою в МПа

$$p_n = 0,1 \pm \rho g H_n, \quad (4)$$

в якій знак плюс використовують, якщо рівень рідини розташований вище осі гідроструминного насоса H_n ;

при розташуванні рівня рідини у посудині 2 нижче осі апарата в рівнянні (4) застосовують знак мінус. Таким чином, безрозмірне відношення тиску в гідроструминному насосі $\Delta p_c / \Delta p_p$ для установки (рис.5,а) можна записати так:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{(p_1 + p_2 + 0,1) + p_n}{[p_{нас} + (p_1 + p_2 + 0,1)] - p_n}, \quad (5)$$

чи з урахуванням виразу (1)

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{p_c - p_n}{p_{нас} + (p_c - p_n)} = \frac{1}{1 + \frac{p_{нас}}{p_c - p_n}}. \quad (6)$$

У цьому рівнянні p_c , p_n – абсолютний тиск, розрахований за формулами (1) і (4); $p_{нас}$ – надлишковий тиск, який визначається за $p-Q$ характеристикою насоса.

На рис.5,б наведено розподіл витрат рідини в елементах установки з відбором корисних витрат рідини після струминного насоса. Відцентровий насос 4 подає витрати $Q_{нас}$ до робочого сопла гідроструминного насоса 3, який підсмоктує корисні витрати

$$Q_{кор} = uQ_{нас}. \quad (7)$$

Сумарні витрати $Q_{нас} + Q_{кор}$ перед насосом 4 діляться: корисні витрати $Q_{кор}$ надходять до посудини споживача 1, а витрати $Q_{нас}$ повертаються на циркуляцію до насоса 4. При цьому вважаємо, що елементи установки проектується у даному випадку, виходячи з умови досягнення максимального ККД, при цьому в установці не здійснюється дроселювання потоків і зменшення напорів. Тому висота розташування посудини 1 однакова при кожному значенні корисної подачі $Q_{кор}$, що відповідає корисному напору установки H_1 .

З виразу (7) виходить, що при коефіцієнті підсмоктування $u > 1$ корисні витрати $Q_{кор}$ перевищують подачу насоса $Q_{нас}$.

Розглянемо розподіл тисків і витрат в установці з відбором корисних витрат перед робочим соплом гідроструминного насоса (рис.5,в,г). Абсолютний тиск на виході з гідроструминного насоса 3 у даному випадку (рис.5,в) можна розрахувати за формулою в МПа

$$p_c = p_2 + p'_c + 0,1, \quad (8)$$

де p'_c – надлишковий тиск (підпір) на всмоктуванні відцентрового насоса; p_2 – надлишковий тиск, який відповідає висоті подачі H_2 ; $p_2 = \rho g H_2$.

На виході з відцентрового насоса 4 створюється надлишковий тиск, який становить

$$p_1 = p'_c + p_{нас}. \quad (9)$$

Тиск p_1 відповідає висоті подачі рідини у посудину споживача 1, тобто $p_1 = \rho g H_1$. Величина p'_c може у реальних умовах зменшуватися аж до значення, яке відповідає допустимій вакуумметричній висоті всмоктування відцентрового насоса. У цьому випадку величина p'_c може стати меншою за атмосферний тиск.

Абсолютний робочий тиск біля сопла гідроструминного насоса для розглядуваної установки в МПа

$$p_p = p_{нас} + (p'_c + p_2 + 0,1), \quad (10)$$

а абсолютний тиск на всмоктуванні гідроструминного насоса для цієї ж установки можна вирахувати за формулою (4). Тоді значення $\Delta p_c / \Delta p_p$ записується у такому вигляді:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{(p_2 + p'_c + 0,1) - p_n}{[p_{нас} + (p_2 + p'_c + 0,1)] - p_n}. \quad (11)$$

Ураховуючи, що за формулою (8) $p_c = p_2 + p'_c + 0,1$, то вираз (11) можна записати так:

$$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{p_c - p_n}{p_{нас} + (p_c - p_n)} = \frac{1}{1 + \frac{p_{нас}}{p_c - p_n}}. \quad (6,a)$$

Ця формула за зовнішніми ознаками повністю відповідає виразу (6), отриманому для установки згідно рис.5,а. Але необхідно пам'ятати, що величина p_c у формулі (6) визначається виразом (1), а в (6,а) – виразом (8).

Розподіл витрат в установці згідно рис.5,г також має свої особливості. Подача насоса $Q_{нас}$ не повністю потрапляє у робоче сопло гідроструминного насоса, як це відбувається в установці на рис.5,б, а ділиться на два потоки: частина витрат $Q_{кор}$ надходить у бак 1, а інша частина Q_p подається у робоче сопло. У даному випадку корисні витрати установки становлять

$$Q_{кор} = uQ_p. \quad (12)$$

Ураховуючи, що $Q_{нас} = Q_p - Q_{кор}$, то можна записати:

$$Q_{нас} = Q_p - uQ_p = (1 + u)Q_p. \quad (13)$$

Віднесемо корисні витрати $Q_{кор}$ [формула (12)] до витрат насоса $Q_{нас}$ [формула (13)], матимемо:

$$\frac{Q_{кор}}{Q_{нас}} = \frac{uQ_p}{(1 + u)Q_p} = \frac{u}{1 + u}. \quad (14)$$

З виразу (14) видно, що відношення $Q_{кор} / Q_{нас}$ для розглядуваної установки (рис.5,з) при любых значеннях коефіцієнта підсмоктування u буде меншим за одиницю. Це значить, що корисна подача завжди менша подачі насоса.

Зауважимо також, що для обох установок (рис.5,а,в) вираз для корисного напору $H_{кор}$ можна записати у вигляді залежності

$$H_{кор} = H_1 + H_2 - H_n. \quad (15)$$

Але складові H_1 цього виразу різні. Надлишковий повний тиск для установки згідно рис.5,а, становить:

$$p_{кор} = (p_1 + p_2 + 0,1) - p_n = p_c - p_n, \quad (16)$$

а для установки згідно рис.5,в, буде:

$$p_{кор} = p_{нас} + [(p'_c + p_2 + 0,1) - p_n] = p_{нас} + (p_c - p_n). \quad (17)$$

Віднесемо величину $p_{кор}$ у формулах (16) і (17) до надлишкового тиску, створюваного насосом, з урахуванням виразів (1) і (8), отримаємо:

для установки згідно рис.5,а

$$\frac{p_{кор}}{p_{нас}} = \frac{p_c - p_n}{p_{нас}}; \quad (18)$$

для установки згідно рис.5,в

$$\frac{p_{кор}}{p_{нас}} = 1 + \frac{p_c - p_n}{p_{нас}}. \quad (19)$$

З розгляду виразів (18) і (19) видно, що відносний тиск $p_{кор} / p_{нас}$ для установки (рис.5,в) на одиницю більший відносного тиску для установки згідно рис.5,а. Це обумовлено тим, що у схемі на рис.5,в корисно використовується тиск, створюваний відцентровим насосом. У той же час в установці з відбором корисної витрати до відцентрового насоса, його тиск безпосередньо у зовнішній мережі корисно не використовується.

Таким чином, збільшення корисної подачі в установці згідно рис.5,а у порівнянні з подачею насоса 4 досягається за рахунок зменшення корисного напору. Збільшення корисного напору в установці згідно рис.5,в отримано за рахунок зменшення корисної подачі установки у порівнянні з подачею відцентрового насоса.

Виконаємо більш детальний аналіз показників роботи установок наведених на рис.5. Одночасно покажемо загальну методику розрахунку циркуляційних установок з гідроструминними і лопатевими насосами з використанням нормальних гідравлічних характеристик струминних насосів і їх окремих кавітаційних характеристик. Для цього розрахуємо показники роботи установок, які відповідають режиму роботи гідроструминних насосів з максимальним значенням ККД.

Вираз для ККД установок можна записати у такому вигляді:

$$\eta_{уст} = \frac{N_{кор}}{N_{нас}} \eta_{нас}, \quad (20)$$

де $N_{кор}$, $N_{нас}$ – відповідно корисна потужність установки і відцентрового насоса; $\eta_{нас}$ – ККД відцентрового насосного агрегату.

Вираз (20) представимо у наступному виді

$$\eta_{уст} = \frac{\rho g H_{кор} Q_{кор}}{\rho g H_{нас} Q_{нас}} \eta_{нас} = \frac{p_{кор} Q_{кор}}{p_{нас} Q_{нас}} \eta_{нас} = \eta_z \eta_{нас}. \quad (21)$$

У цій формулі η_z – коефіцієнт зменшення ККД установки, яка працює з корисною подачею $Q_{кор}$ і корисним тиском $p_{кор}$, у порівнянні з ККД відцентрового насоса агрегату, який

працює з подачею $Q_{нас}$ і тиску $p_{нас}$. Назвемо величину η_z ККД гідравлічної частини схеми чи просто гідравлічним ККД установки.

Таким чином гідравлічний ККД установки становить:

$$\eta_z = \frac{Q_{кор} p_{кор}}{Q_{нас} p_{нас}}, \quad (22)$$

де $Q_{кор}/Q_{нас}$ – величина, яка визначається за формулою (7) для установки, виконаної за схемою рис.5,б, і за формулою (14) для установки, наведеної на рис.5,з; $p_{кор}/p_{нас}$ – відношення, розраховане за формулою (18) для установки виконаної за схемою рис.5,а, і за формулою (19) для установки, наведеної на рис.5,в.

Для забезпечення нормальної роботи установок необхідно, щоб гідрострумний насос працював у режимі, який відповідає максимальному ККД. Такій умові на його характеристиці відповідають точки, що лежать на лінії оптимальних режимів. Ця лінія пересікає криві $u = \text{const}$ у точках, які відповідають певним значенням $\Delta p_c / \Delta p_p$ і d_d/d_c . Кожна точка перетину кривої оптимальних режимів з кривою u у координатному полі $\Delta p_c / \Delta p_p - d_d/d_c$ відповідає такому значенню коефіцієнта подачі u , за якого забезпечується максимальний ККД гідрострумного насоса, який має задані значення $\Delta p_c / \Delta p_p$ і d_d/d_c .

З урахуванням сказаного загальну методику розрахунку оптимальних параметрів ($Q_{кор}/Q_{нас}$, $p_{кор}/p_{нас}$ і η_z) установок з гідрострумними і лопатевими насосами можна подати у наступному вигляді.

1. Задаємося значеннями коефіцієнта підсмоктування u і за робочою характеристикою гідрострумного насоса визначаємо відношення тисків $\Delta p_c / \Delta p_p$ і діаметрів d_d/d_c , які забезпечать максимальний ККД.

2. Виражаємо величини p_c , p_p і p_n , а також $Q_{кор}/Q_{нас}$, $p_{кор}/p_{нас}$ і η_z через параметри установки, коефіцієнт підсмоктування u і відношення тисків $\Delta p_c / \Delta p_p$.

3. Для визначення обмежень на параметри установки, які викликані виникненням кавітації у гідрострумному насосі, при отриманих значеннях u і d_d/d_c по кавітаційній характеристиці насоса (знаходимо максимально допустиме відношення абсолютних тисків робочої рідини до абсолютного тиску на всмоктуванні, при якому ще не виникає кавітація).

У табл.1 наведені отримані розрахункові вирази (формули) для аналізу установок, схеми яких показані на рис.5. Табл.2 містить результати розрахунку цих установок, які у графічному вигляді подані на рис.6.

Таблиця 1

Формули для визначення основних параметрів установок наведених на рис.5

Основний розрахунковий параметр	Розрахункові формули для установки	
	Рис.5,а,б	Рис.5,в,з
p_c	$p_1 + p_2 + 0,1$	$p'_c + p_2 + 0,1$
p_p	$p_{нас} + (p_1 + p_2 + 0,1)$	$p_{нас} + (p'_c + p_2 + 0,1)$
$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p} = \frac{p_c - p_n}{p_p - p_n}$	$\frac{(p_1 + p_2 + 0,1) - p_n}{p_{нас} + (p_1 + p_2 + 0,1) - p_n} = \frac{1}{1 + \frac{p_{нас}}{p_c - p_n}}$	$\frac{(p'_c + p_2 + 0,1) - p_n}{p_{нас} + (p'_c + p_2 + 0,1) - p_n} = \frac{1}{1 + \frac{p_{нас}}{p_c - p_n}}$
$p_{кор}/p_{нас}$	$\frac{(p_1 + p_2 + 0,1) - p_n}{p_{нас}} = \frac{p_c - p_n}{p_{нас}}$	$\frac{p_{нас} + (p_c + p_2 + 0,1) - p_n}{p_{нас}} = \frac{1}{1 + \frac{p_{нас}}{p_c - p_n}}$

$\frac{p_{кор}}{p_{нас}} = f\left(\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}\right)$	$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}$ $\left(1 - \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}\right)$	$1 / \left(1 - \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}\right)$
$\frac{p_{нас}}{p_{кор}} = f\left(\frac{\Delta p_p}{\Delta p_c}\right)$	$\frac{\Delta p_p}{\Delta p_c} - 1$	$\frac{\Delta p_p}{\Delta p_c}$
$Q_{кор}/Q_{нас}$	u	$u/(1+u)$
$\eta_z = f\left(u, \frac{\Delta p_c}{\Delta h_p}\right)$	$u \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}$ $\left(1 - \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}\right)$	$\frac{u}{(1+u) \left(1 - \frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}\right)}$

Таблиця 2

Основні параметри установок, виконаних за схемами рис.5 (див. табл. 5.1)

Параметри струминного насоса					Параметри установок					
u	$\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}$	$\frac{\Delta p_p}{\Delta p_c}$	$\frac{d_z}{d_c}$	$\frac{p_p}{p_n}$	Рис.5,а, б			Рис.5,в, г		
					$\frac{p_{кор}}{p_{нас}}$	$\frac{Q_{кор}}{Q_{нас}}$	η_z	$\frac{p_{кор}}{p_{нас}}$	$\frac{Q_{кор}}{Q_{нас}}$	η_z
0,1	0,550	1,82	1,20	9,5	1,220	0,1	0,122	2,220	0,09	0,204
0,2	0,480	2,10	1,28	9,5	0,910	0,2	0,182	1,910	0,17	0,400
0,3	0,420	2,38	1,35	9,5	0,720	0,3	0,217	1,720	0,23	0,470
0,4	0,390	2,56	1,45	9,5	0,640	0,4	0,256	1,640	0,29	0,600
0,8	0,260	3,84	1,80	9,5	0,350	0,8	0,280	1,350	0,45	0,680
1,2	0,190	5,12	2,10	9,5	0,235	1,2	0,288	1,235	0,57	0,720
1,6	0,145	6,90	2,40	10,0	0,170	1,6	0,272	1,170	0,62	0,760
2,0	1,115	8,75	2,80	11,5	0,130	2,0	0,260	1,130	0,67	0,780
2,4	0,093	10,57	3,10	12,0	0,100	2,4	0,252	1,100	0,71	0,800
2,8	0,088	10,00	3,30	12,5	0,096	2,8	0,238	1,096	0,74	0,816
3,2	0,068	12,80	3,50	15,0	0,073	3,2	0,227	1,073	0,76	0,830
3,6	0,057	14,30	3,80	17,5	0,061	3,6	0,218	1,061	0,78	0,843
4,0	0,050	20,00	4,20	20,0	0,053	4,0	0,210	1,053	0,80	0,860
6,0	0,028	36,30	5,60	26,0	0,029	6,0	0,170	1,029	0,86	0,880
8,0	0,018	55,50	7,10	40,0	0,018	8,0	0,146	1,018	0,89	0,900
10,0	0,012	80,00	8,50	50,0	0,012	10,0	0,126	1,012	0,91	0,920

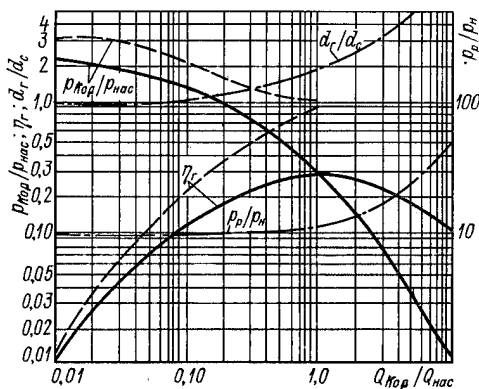


Рис.6. Основні показники циркуляційних установок з гідроструминними і лопатевими насосами для оптимальних режимів роботи:
 ————— — схема на рис.5,а;
 - - - - - — схема на рис.5,б;
 - - - - - — гідроструминний насос

Варто зауважити, що показники роботи установок у значному ступені залежать від числових значень $u = f\left(\frac{\Delta p_c}{\Delta p_p}; \frac{d_z}{d_c}\right)$. Тому при використанні різних методик розрахунку струминних апаратів [5, 6]

значення величин $Q_{кор}/Q_{нас}$ і $p_{кор}/p_{нас}$ можуть трохи відрізнитися.

Розглядаючи табл. 2 і дані рис.6, можна зробити наступні висновки.

1. Для установок з відбором рідини після струминного апарата (див. рис.5,а) відношення $p_{кор}/p_{нас}$ у діапазоні зміни $Q_{кор}/Q_{нас} > 0,2$ буде меншим одиниці, тобто такі установки створюють напір менше напору відцентрового насоса у той же час при $p_{кор}/p_{нас} < 0,3$ установки забезпечують подачу більшу за подачу насоса $Q_{нас}$. Гідравлічний ККД таких установок не перевищує ККД струминного насоса при тих же значеннях відношення тисків $\Delta p_c/\Delta p_p$. Але за рахунок того, що тиск p_c , створюваний струминним насосом, коли проходить через відцентровий насос, збільшує тиск у соплі гідроструминного насоса. Показники циркуляційної установки за однакового тиску насоса $p_{нас}$ більші, ніж для схеми, у якій гідроструминний і відцентровий насоси установлені послідовно.

2. Установки з відбором корисних витрат рідини після відцентрового насоса (див. рис.5,в) дозволяють збільшити корисний тиск у порівнянні з тиском насоса більш ніж у три рази (при $Q_{кор}/Q_{нас} \rightarrow 0$). Але при цьому відповідно зменшується корисна подача установки у порівнянні з подачею відцентрового насоса. Гідравлічний ККД таких установок у всьому діапазоні подач $Q_{кор}/Q_{нас} = 0...1$ більший, ніж гідравлічний ККД установок, виконаних у відповідності зі схемою приведеною на рис.5,а. При цьому якщо $Q_{кор}/Q_{нас} \rightarrow 1$, то $\eta_e \rightarrow 1$, але $p_{кор}/p_{нас} \rightarrow 1$.

3. При однакових значеннях відношення $Q_{кор}/Q_{нас}$ в обох схемах для забезпечення оптимального режиму необхідно ставити гідроструминні насоси з рівними значеннями геометричного параметра d_z/d_c (див. рис.6). Але при рівній подачі насоса $Q_{нас}$ абсолютні значення d_z і d_c в установках будуть різні. Останнє обумовлено різними витратами, які проходять через сопла насосів в установках за схемою рис.5,б,г (див. табл. 1), а також різними значеннями тиску робочої рідини p_p біля сопла (див. рис.5 і табл.1). Зі збільшенням $Q_{кор}/Q_{нас}$ оптимальне значення відношення d_z/d_c збільшується.

4. У діапазоні $Q_{кор}/Q_{нас} < 1$ безкавітаційна робота гідроструминних насосів в обох установках забезпечується, якщо відношення абсолютного робочого тиску p_p до тиску на всмоктуванні p_n не перевищує 10. [У загальному випадку при співрозмірності тиску на всмоктуванні p_n і тиску насичення пари рідини $p_n = p_{n,n}$ замість відношення p_p/p_n необхідно використовувати відношення $(p_p - p_k)/(p_n - p_k)$]. Це значить, наприклад, що за атмосферного тиску на всмоктуванні гідроструминного насоса максимальний абсолютний тиск робочої рідини p_p для забезпечення безкавітаційної роботи не повинен перевищувати 1 МПа. Кавітація у багатьох випадках обмежує можливості установок, тому висновки про необмежене підвищення тиску у багатоступінчастих установках за схемою на рис.5,в, зроблені в [7], вимагають корекції з урахуванням виникнення кавітації зі збільшенням p_p . Для установок виконаних за схемою на рис.5,а, при $Q_{кор}/Q_{нас} > 1$ допустимий тиск збільшується з ростом $Q_{кор}/Q_{нас}$ (допустиме значення відношення p_p/p_n збільшується від 10 до 50). Це пояснюється збільшенням відношення d_z/d_c .

5. У зв'язку з тим, що корисна висота підйому рідини складається з двох величин – H_1 і H_2 (див. рис.5), при $p_{кор}/p_{нас} = \text{const}$ перерозподіл співвідношення між H_1 і H_2 (при $H_1 + H_2 = \text{const}$) не змінює показники роботи установок. При цьому в установці за рис.5,а величину H_1 можна зменшувати до нуля, відповідно збільшуючи величину H_2 . (Величина H_1 може бути навіть від'ємною і рівній допустимому вакуумметричному напору всмоктування для відцентрового насоса, але це зменшує надійність роботи установки). В установці, яка працює з відбором рідини до струминного насоса (див. рис.5,в), зменшувати величину H_1 недоцільно тільки до значення, яке відповідає тиску насоса $p_{нас}$ при розрахунковій подачі. Подальше зменшення H_1 змінює подачу насоса у відповідності з його гідравлічною характеристикою, при цьому зміниться і відношення $p_{кор}/p_{нас}$.

6. Графіки, наведені на рис.6, відповідають тільки одній точці на характеристиці гідроструминного насоса. Для побудови нормальної і кавітаційної характеристик установок з фіксованим значенням відношення d_z/d_c при зміні тисків необхідно визначити величини $Q_{кор}$ і $p_{кор}$ для всього діапазону зміни параметрів установки. При цьому змінні величини, при незмінному положенні елементів установки, можуть бути p_n і p_1 та ін. Більш детально ці питання викладені у наступних розділах.

Література

1. Григорьев В.М. Вакуумное водопонижение. М.: Стройиздат, 1973.– 223 с.
2. Лямаев Б.Ф. Применение водо-воздушных эжекторов для откачки воздуха из центробежных насосов// Водоснабжение и санитарная техника, 1966, №10.– С. 11-13.
3. Смородинов М.И. Водо-понижительные установки. М.: Стройиздат, 1984.– 117 с.
4. Надысев В.С. Двухструйная канализационная насосная станция// Водоснабжение и санитарная техника, 1964, №2.– С. 11-13.
5. Кулінченко В.Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник. К.: “ІНКІОС”, Центр навчальної літератури, 2006.– 616 с.
6. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. 2-е издание. М.: Энергия, 1970.– 288 с.
7. Рудник В.П. Преобразователь характеристики центробежного насоса. К.: Будівельник, 1970.– 112 с.