

УДК 66.045

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ОХП,
проф., доцент
_____ Архипов О.Г.
« ____ » _____ 20 ____ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до магістерської роботи на тему

**Визначення оптимальних технологічних та
геометричних параметрів зрошувача сифонного типу з
розробкою методики його інженерного розрахунку**

Науковий керівник _____ доц. Москалик В.М. _____

Студент групи _____ Вернер С.І. _____

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему
Визначення оптимальних технологічних та геометричних параметрів
зрошувача сифонного типу з розробкою методики його інженерного
розрахунку
(Назва теми)

Листів – 72, ілюстрацій – 22, таблиць – 5, посилань – 45.

Напрямок дипломної роботи обрана задача розробки сифонного зрошувача нової конструкції за патентом України №60720, який має розширений прогнозований діапазон сталої роботи, що дозволяє знизити витрати по труду і матеріалам при його уніфікації.

Збільшення ефективності роботи насадкового абсорберу досягається завдяки телескопічній конструкції ковпака та зливної труби, що дає можливість осьового переміщення без зміни оптимальної відстані між днищем мірної ємності і нижнім зрізом телескопічного ковпака, а також між верхнім зрізом телескопічної зливної труби і кришкою телескопічного ковпака.

Об'єкт дослідження – сифонний зрошувач рідини.

Метою дипломної роботи є дослідження гідродинаміки сифонного зрошувача.

Експериментальне дослідження об'ємної витрати води в залежності від горизонту рідини в ємності сифону проводили шляхом контролю рідини, що витікає з сифону за допомогою мірного циліндра і секундоміра при фіксованому значенні витрати рідини.

Практична значимість отриманих результатів для хімічної та суміжних галузей промисловості полягає у створенні алгоритму інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини за допомогою одержаних раніше математичних описів. Новизна роботи – вперше теоретично одержані дані з гідродинаміки сифонного зрошувача у доперіодичному, періодичному та постперіодичному режимах і підтверджені експериментально, завдяки чому розроблена його методика інженерного розрахунку. Визначена задовільна узгодженість конструктивних розмірів сифонного зрошувача запропонованої конструкції його заданим технологічним параметрам.

(Текст реферату)

Гідродинаміка, сифонний зрошувач, телескопічний ковпак, зливна труба, мірна ємність, об'ємна витрата

(Ключові слова)

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	4
Вступ.....	6
1 Аналітичний огляд	9
1.1 Основні характеристики руху рідини.....	9
1.2 Режими руху рідини.....	14
1.3 Рівняння суцільності потоку.....	18
1.4 Рівняння Бернуллі	20
1.5 Витікання рідини з ємності при постійному напорі.....	23
1.6 Гідравлічний опір зрошувача.....	25
1.7 Розподіл рідини зрошувачами	26
1.8 Зрошувачі, які не розбризкують рідину	31
2 Новий зрошувач рідини сифонного типу за патентом України №60720.....	38
3 Визначення оптимальних технологічних та геометричних параметрів зрошувача рідини сифонного типу.....	44
4 Експериментальне дослідження роботи зрошувача рідини сифонного типу	50
4.1 Опис схеми експериментальної установки та методика проведення експерименту	50
4.2 Прибори, вимірювальна техніка і пристрої	52
4.3 Результати експериментальних досліджень	54
5 Обговорення результатів досліджень.....	56
6 Методика інженерного розрахунку зрошувача сифонного типу.....	59
Висновки.....	67
Перелік посилань	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- d – діаметр, m ;
 d_e – еквівалентний діаметр каналу, по якому рухається рідина, m ;
 d_c – внутрішній діаметр сифонної трубки, m ;
 dh – елементарна зміна горизонту рідини, m ;
 dt – елементарний проміжок часу, s ;
 dV – елементарний об'єм, m^3 ;
 G – масова витрата рідини, kg/s ;
 g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ;
 H – повний гідродинамічний напір, m ;
 h – горизонт рідини в ємності, m ;
 h' – висота сифонної трубки, m ;
 h_1, h_2, h_3, h_4 – горизонт рідини у відповідних перетинах 1–1, 2–2, 3–3, 4–4, m ;
 h_5 – висота сифонної трубки в ємності, m ;
 h_6 – висота від верхнього зрізу сифону до дна ємності, m ;
 h_{π} – втрати напору на подолання всіх гідравлічних опорів, m ;
 f – площа поперечного перетину, m^2 ;
 f_1 – площа поперечного перетину ємності, m^2 ;
 f_2 – площа поперечного перетину сифонної трубки, m^2 ;
 K_{Γ} – об'ємний коефіцієнт абсорбції;
 k – сила внутрішнього тертя;
 L – щільність зрошення, $m^3/m^2 \cdot год$;
 n – відстань між шарами рідини, що рухається, m ;
 p_a – атмосферний тиск, Pa ;
 p_1, p_3, p_3, p_4 – тиск відповідно у перетинах 1–1, 2–2, 3–3, 4–4, Pa ;
 Q – об'ємна витрата рідини, m^3/s ;
 $Q_{ВХ}$ – об'ємна витрата рідини на вході до ємності, m^3/s ;
 $Q_{ВИХ}$ – об'ємна витрата рідини на виході з ємності, m^3/s ;
 q – витрата рідини в точці зрошення, cm^3/s ;
 r_{Γ} – гідравлічний радіус, m ;
 Re – критерій Рейнольдса;
 T – період роботи сифонного зрошувача, s ;
 t – час, s ;
 $t_{\text{ч}}$ – час часткового спорожнювання, s ;
 $t_{\text{к}}$ – час корисного спорожнювання, s ;
 $V_{\text{ч}}$ – об'єм рідини часткового спорожнювання, m^3 ;
 $V_{\text{к}}$ – об'єм рідини корисного спорожнювання, m^3 ;
 $V_{\text{д}}$ – об'єм рідини періодичного режиму, m^3 (у розділі 6 – об'єм дози, m^3);
 $V_{\text{ф}}$ – об'єм рідини фіксований, m^3 ;
 z – геометричний напір (нівелірна висота), m ;
 α – коефіцієнт Коріоліса ($\alpha \approx 1$);

- δ – товщина сифонної трубки, *м*;
- φ – коефіцієнт швидкості;
- γ – питома вага рідини, *кгс/(м³)*;
- σ – поверхневий натяг, *кгс/м*;
- ε – коефіцієнт стиснення струменя;
- θ – кут змочування;
- λ – коефіцієнт;
- μ – коефіцієнт в'язкості (динамічна в'язкість), *пуаз* або *Н·с/м²*
(у розділі 1.5 – коефіцієнт витрати);
- τ – напруга зсуву, *Н/м²*;
- ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості (кінематична в'язкість),
стокс або *м²/с*;
- ζ – коефіцієнт опору;
- ξ_K – коефіцієнт гідравлічного опору висхідної гілки сифонної
трубки;
- ξ_C – коефіцієнт гідравлічного опору сифонної трубки;
- Π – змочений периметр, *м*;
- ρ – щільність середовища, *кг/м³*;
- ω – середня швидкість течії рідини, *м/с*.

ВСТУП

Зрошувачі застосовують у хімічній промисловості, металургії, харчовій промисловості та інших галузях для точної роздачі рідини за певний проміжок часу. Основною перевагою таких пристроїв є простота конструкції і можливість здійснення роботи без підведення зовнішньої енергії, внаслідок перетворення частини власної потенційної енергії в кінетичну. Існуючі сифонні зрошувачі рідини дають можливість зміни об'єму доз плавно і в широкому діапазоні, проте вони позбавлені важливої переваги – відсутності рухомих елементів; до того ж радіус вигину сифонної трубки залежить від її діаметра і матеріалу, що накладає обмеження на мінімальні габарити пристрою в цілому.

Таким чином, задача вдосконалення сифонного зрошувача рідини з можливістю розширення прогнозованого діапазону сталої роботи, є **актуальною**, що і вирішило напрямок дипломної роботи.

В дипломній роботі запропоновано використання сифонного зрошувача рідини за патентом України №60720, що містить мірну ємність, трубопровід для підведення рідини з регулюючим вентилям, зливну трубу, закріплену в днищі ємності та ковпак, причому зливна труба і ковпак мають телескопічну конструкцію.

Для розробки інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини можливо використання математичних описів, розроблених раніше. На їх основі створено алгоритм інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини.

Метою дипломної роботи є дослідження гідродинаміки сифонного зрошувача, а саме експериментальне дослідження об'ємної витрати води в залежності від горизонту рідини в ємності сифонного зрошувача у

доперіодичному, періодичному та постперіодичному режимах та розробка його інженерного розрахунку.

Для досягнення мети поставлені наступні **задачі**:

– провести літературний огляд основних положень гідродинаміки, ознайомитись з основними типами зрошувачів та їх конструкцією; визначити вплив типу зрошення на параметри технологічного процесу;

– розробити схему експериментальної установки, а також методику постановки і обробки експериментальних даних для визначення гідродинаміки сифонного зрошувача;

– одержати експериментальні дані з метою узагальнення результатів експериментів і порівняти їх з літературними джерелами;

– підготувати алгоритм інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини за допомогою одержаних раніше математичних описів для інженерів-проектувальників.

Методи дослідження. Експериментальне дослідження гідродинаміки сифонного зрошувача проводили на спеціально розробленій експериментальній установці на кафедрі машинознавства та обладнання промислових підприємств. У якості сифону використовувалась прямокутна скляна призма 50x100 мм, висотою 230 мм. Експериментальне дослідження об'ємної витрати води в залежності від горизонту рідини в ємності сифону проводили шляхом контролю рідини, що витікає з сифону за допомогою мірного циліндра і секундоміра при фіксованому значенні витрати рідини.

Статистичну обробку експериментальних даних вели за допомогою персонального комп'ютера.

Об'єкт дослідження – сифонний зрошувач рідини.

Предмет дослідження – гідродинаміка сифонного зрошувача.

Практична значимість отриманих результатів для хімічній на суміжних галузях промисловості полягає у створенні надійного алгоритму інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини. Результати

представляють інтерес для інженерів-конструкторів науково-дослідних та проектних організацій.

Новизна роботи – вперше теоретично одержані дані з гідродинаміки сифонного зрошувача у доперіодичному, періодичному та постперіодичному режимах і підтверджені експериментально, завдяки чому розроблена його методика інженерного розрахунку. Визначена задовільна узгодженість конструктивних розмірів сифонного зрошувача запропонованої конструкції його заданим технологічним параметрам.

Публікації. За темою дипломної роботи опубліковано одна стаття у журналі «Питання хімії та хімічної технології» (м. Дніпро), дві статті у науково-виробничому журналі «Хімічна промисловість України» (м. Київ), одержано патент України № 60720, а також результати роботи доповідались на всеукраїнській науково-практичній конференції «Майбутній науковець - 2018».

Структура та обсяг дипломної роботи. Дипломна робота складається з реферату, переліку умовних позначень, вступу, шести розділів, висновків та списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дипломної роботи становить 72 сторінки, з них 22 рисунка за текстом, 5 таблиць, списку використаних джерел з 45 найменувань на 3 сторінках.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

1.1 Основні характеристики руху рідини

Рідиною називається середовище, яке в стані рівноваги не чинить опір деформації. Рідини і гази об'єднує властивість плинності. Краплинні рідини мають малу стискуваність, тому, на відміну від газів, перебуваючи в ємності, вони займають не весь обсяг, а тільки той обсяг, який властивий даній масі рідини, з чіткою межею поділу. При відділенні від твердої поверхні краплинні рідини формують краплі [1].

Переміщення рідин і газів за закритими трубопроводами або каналам відбувається під дією тиску, створюваного різницею рівнів рідини або роботою насосів. Рух рідин і газів характеризується низкою факторів, розглянутих нижче.

Обсяг рідини, що протікає через будь-яку поперечний переріз труби в одиницю часу, називають **витратою** рідини і висловлюють його в $m^3/сек$, $л/сек$ или $см^3/сек$. У різних точках поперечного перерізу потоку швидкість частинок рідини неоднакова. Максимальна швидкість спостерігається по осі трубопроводу; чим ближче до стінок, тим меншою стає швидкість частинок рідини, і у самих стін швидкість їх внаслідок прилипання до стін дорівнює нулю.

Однак можна припустити, що частинки рідини мають однакову швидкість по всьому перетину потоку; таку умовну швидкість називають **середньою швидкістю**; її можна знайти як частку від ділення обсягу рідини, що проходить в одиницю часу, на площу поперечного перерізу трубопроводу або каналу [2].

Сталий (стаціонарний) рух – це такий рух, при якому швидкість частинок в кожній точці об'єму потоку з плином часу не змінюється.

Несталий (нестационарний) рух – це такий рух, при якому швидкість частинок в кожній точці об'єму потоку змінюється з плином часу [3]

Між витратою рідини, площею поперечного перерізу трубопроводу і середньою швидкістю протікання рідини є такі залежності:

$$Q = \omega f \quad (1)$$

$$f = \frac{Q}{\omega} \quad (2)$$

$$\omega = \frac{Q}{f} \quad (3)$$

Витрата рідини G [2]:

$$G = \omega f \gamma \quad (4)$$

В'язкість відображає властивість рідини чинити опір відносному переміщенню (зрушенню) сусідніх частинок. В'язкість викликає внутрішнє тертя, яке залежить від сил зчеплення між окремими молекулами.

Згідно із законом Ньютона сила внутрішнього тертя прямо пропорційна відносній швидкості переміщення і величині поверхні зіткнення цих шарів. Вона залежить від властивостей рідини, будучи її фізичною характеристикою, і не залежить від умов витікання.

Закон Ньютона виражається рівнянням:

$$k = \mu F \frac{d\omega}{dn} \quad (5)$$

де μ – коефіцієнт пропорційності, що залежить від властивостей рідини;

$\frac{d\omega}{dn}$ – приріст (похідна) швидкості, що припадає на одиницю довжини відстані між двома шарами; ця похідна називається «градієнтом швидкості» по нормалі.

Величину, зворотну в'язкості, називають плинністю:

$$\eta = \frac{1}{\mu} \quad (6)$$

Відношення абсолютної в'язкості до щільності рідини називають кінематичним коефіцієнтом в'язкості або просто кінематичною в'язкістю:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu g}{\gamma} \quad (7)$$

У лабораторній практиці в'язкість зазвичай визначають за допомогою вісокзіметров в градусах Енглера.

В'язкість можна розглядати як функцію тертя молекул одна об одну, що залежить від їх будови і просторового розташування. Тому зміна температури рідини істотно впливає на величину в'язкості. В'язкість крапельних рідин сильно зменшується з підвищенням температури і тим швидше, чим вище величина в'язкості; в'язкість газів, навпаки, зі зростанням температури збільшується [2].

Для ілюстрації ефекту в'язкості розглянемо обтікання плоскої твердої поверхні потоком нев'язкої, а потім в'язкої рідини. У нев'язкій (ідеальній) рідині (рисунок 1.1) швидкість потоку у міру наближення до стінки не змінюється, рідина вільно прослизає уздовж неї.

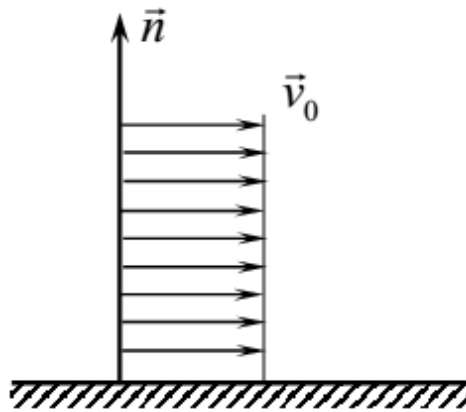


Рисунок 1.1 – Швидкість обтікання стінки нев'язкою рідиною

У другому випадку (рисунок 1.2), найближчі до твердої поверхні частинки рідини в результаті тертя "прилипають" до неї, так, що швидкість потоку на ній виявляється рівною нулю. У міру віддалення від стінки частки

рідини зсуваються одна щодо одної, так як сили взаємного тяжіння між молекулами самої рідини менше сил тяжіння між молекулами і твердої стінкою. Однак ці сили будуть перешкоджати зрушенню, завдяки чому між шарами виникнуть дотичні напруження. У міру віддалення від стінки швидкості рідких частинок поступово наростають до заданої швидкості ω_0 набігаючого потоку.

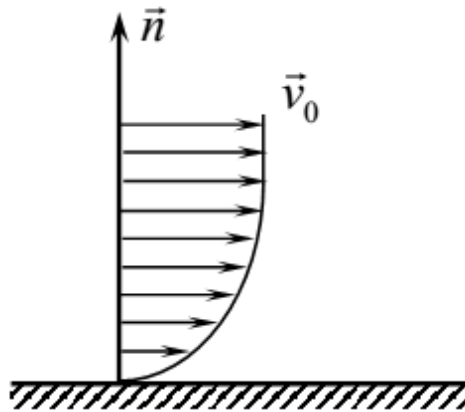


Рисунок 1.2 – Швидкість обтікання стінки в'язкою рідиною

Рідини, що підкоряються закону тертя Ньютона (5), називаються ньютонівськими. Існують і неньютонівські рідини, у яких в'язкі властивості більш складні (масла, смоли, розчини полімерів, пасти, пульпи тощо.) [1]. В'язкість для них – величина змінна і залежить від напруги зсуву. Крім того, неньютонівські рідини в свою чергу так само поділяються на певні групи. Якщо для звичайних ньютонівських рідин (наприклад, вода і багато інших рідин) залежність між напругою зсуву і градієнтом швидкості виражається прямою лінією (рисунок 1.3), то для неньютонівських рідин ця залежність є криволінійною. Вид цих залежностей називається кривими течії або реологічними кривими. Тангенс кута нахилу кривої течії $\operatorname{tg}\alpha$ визначає силу опору і чисельно рівний коефіцієнту в'язкості [3].

На поверхні рідин в тій чи іншій мірі проявляється особливість властивостей поверхневого шару. Молекули, що знаходяться всередині рідини, внаслідок взаємного тяжіння відчувають в середньому однаковий

тиск в усіх напрямках, молекули ж, що знаходяться в поверхневому шарі, притягуються молекулами внутрішніх шарів з більшою силою, ніж з боку навколишнього середовища.

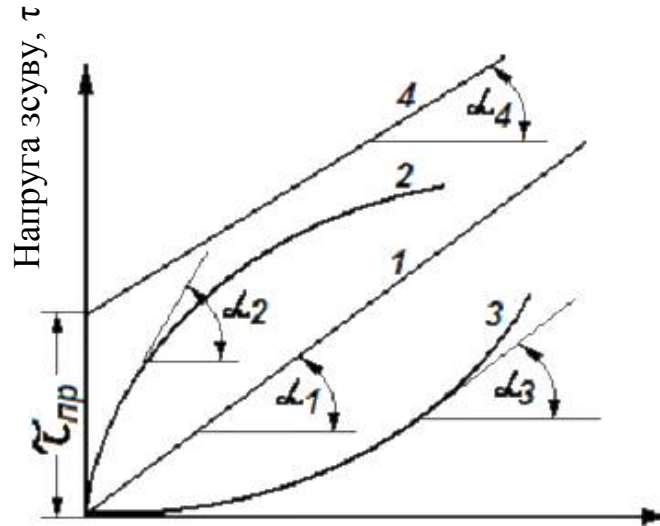


Рисунок 1.3 – Реологічні криві рідин:

- 1 – ньютоновські рідини; 2 – псевдопластичні рідини;
3 – дилатантні рідини, 4 – бінгамівські рідини

Внаслідок цього в поверхневому шарі виникає тиск, спрямований по нормалі до поверхні. Дія цих сил проявляється в прагненні речовини зберегти свою поверхню. При підвищенні ступеня дисперсності рідких речовин поверхня їх значно збільшується і разом з цим вплив поверхневих властивостей відповідно зростає. Збільшення поверхні тіл вимагає витрати роботи. Величину цієї роботи, віднесеної до одиниці поверхні, називають **поверхневим натягом** і позначають буквою σ [4].

Найбільш помітно поверхневий натяг на межі трьох середовищ: газ – рідина – тверда стінка (рисунок 1.4). У цьому випадку вводять поняття кута змочування θ . Якщо $\theta < \pi/2$, то рідина називається змочувальною; якщо $\theta > \pi/2$ – незмочувальною [1].

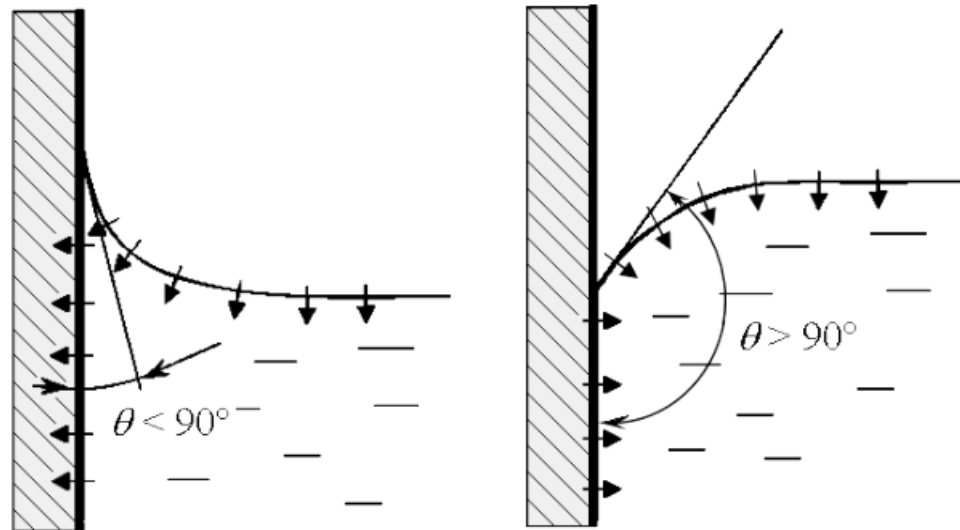


Рисунок 1.4 – Змочувальна та незмочувальна рідини

1.2 Режими руху рідини

Існування двох абсолютно протилежних і принципово різних структур потоків рідини було виявлено Гагеном (1869 р.), Менделєєвим (1880 р.) і Рейнольдсом (1883р.).

Найбільш повно режими течії були досліджені Рейнольдсом на установці, схема якої приведена на рисунку 1.5. Установка складалася з резервуара 1, в нижній частині якого була виведена прозора скляна трубка 4, що оснащена на кінці краном 7. Лівий кінець трубки мав плавний вхід, в який була вставлена трубка меншого розміру, сполучена з резервуаром 3, наповненим індикатором (темною фарбою). Ця трубка була забезпечена краном 5. Над резервуаром 1 був встановлений бачок 2 з краном 6 на висоті повільно відкривався на певну витрату рідини кран 7. Після досягнення стаціонарності потоку рідини в трубці 4, за допомогою крана 5 по осі трубки 4 вводився індикатор з резервуара 3. У міру закінчення досліджуваної рідини візуально спостерігалася структура потоку рідини в трубці 4 за поведінкою тонкого струменя індикатора.

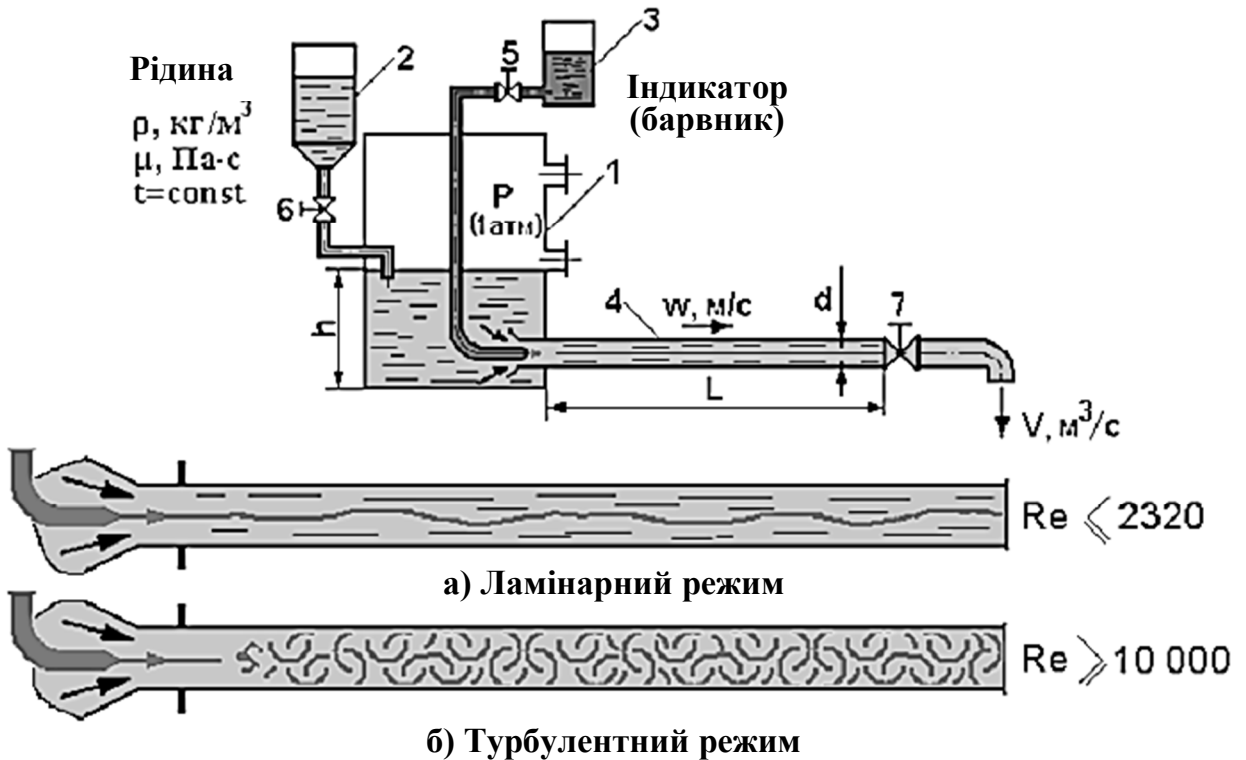


Рисунок 1.5 – Дослід Рейнольдса з визначення гідродинамічних режимів течії рідини

Проведені дослідження показали, що при швидкостях рідини менше деякого критичного значення $\omega_{кр}$ струмок барвника, проходячи по всій довжині трубки 4, що не розмивався і не змішувалася з рідиною по всьому перетину, утворюючи на поворотах правильну систему кривих.

При швидкостях, що перевищують це критичне значення $\omega > \omega_{кр}$ струмок індикатора, потрапляючи в потік рідини, починав змішуватися з нею, заповнюючи весь перетин трубки. І чим вище було значення швидкості, тим більш інтенсивне спостерігалось перемішування. Очевидно, що в першому випадку, коли індикатор розмивався, рідина рухалася шарами паралельно стінкам труби. Перебіг нагадував паралельно-струменевий або шаруватий рух, яке було названо ламінарним.

У другому випадку, коли при швидкості потоку, що перевищує деякий критичний поріг, незважаючи на триваючий поступальний рух рідини по

трубі, спостерігалася така картина: на деякій ділянці від введення індикатора, останній з самого початку не змішувався з потоком рідини, а потім спостерігалася утворення завихрень, і індикатор перемішувався з рідиною. Такий рух було названо турбулентним [3].

У разі ламінарного руху (рисунок 1.6, I), коли окремі частинки рухаються паралельно один одному по прямому трубопроводу, швидкість виявляється найбільшою по осі трубопроводу (ω_0) і зменшується до країв спочатку повільно, а потім швидше, поки не стане рівною нулю біля самої стінки. Розподіл швидкостей за діаметром трубопроводу відбувається за законом параболи; середня швидкість руху ω_{cp} дорівнює половині максимальної.

При збільшенні швидкості впорядкованість руху порушується і виникає турбулентний рух; швидкість окремих частинок стає непостійною і коливається як за величиною, так і за напрямком близько деякої середньої величини. Середня швидкість паралельна осі трубопроводу [5].

Розподіл середніх швидкостей за діаметром d трубопроводу в разі турбулентного руху виражається деякої кривої, подібної до параболи, але тільки з більш широкою вершиною (рисунок 1.6, II). Частинки рідини при своєму русі співударяються між собою і зі стінками каналів. У кожній фіксованій точці об'єму рідини, що переміщується, відбувається безладна зміна швидкості за часом, як за абсолютним значенням, так і за напрямком. Відбуваються коливання і пульсації швидкості, формуються, так звані, турбулентні вихори. Масштаб і час життя таких вихорів залежать від фізико-хімічних властивостей рідин і від швидкості течії. Поблизу стін залишається прикордонний шар σ , де відбувається приблизно прямолінійне зменшення швидкості до нуля. У цьому шарі рідина рухається ламінарно [6].

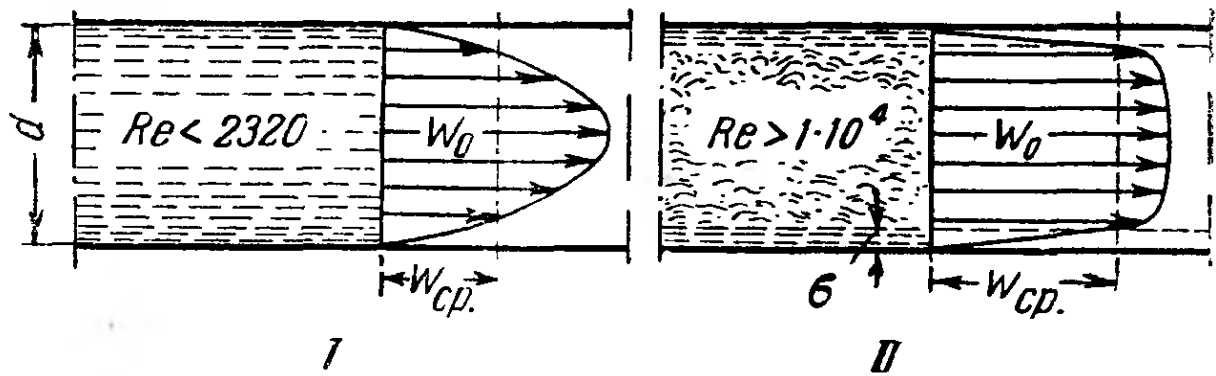


Рисунок 1.6 – Розподілення швидкостей при ламінарному (I) та турбулентному (II) русі рідини в трубці

Таким чином, турбулентний рух не існує в чистому вигляді, а завжди супроводжується ламінарним. Точно так само і при ламінарному русі є вихороутворення, тобто елементарні частинки рідини, рухаючись поступально, деформуються і обертаються, хоча їх результуюча швидкість спрямована паралельно осі потоку [7].

Рейнольдсом було встановлено, що перехід від ламінарного до турбулентного режиму визначається з одного боку фізичними властивостями рідини (ρ і μ), а з іншого - швидкістю течії ω і діаметром трубки d . На підставі численних експериментів з різними рідинами і трубками, при різних швидкостях течії в результаті обробки результатів дослідів Рейнольдсом було встановлено, що встановлені режими течії виявляються тільки при певному співвідношенні зазначених параметрів. Рейнольдсом був сформований безрозмірний комплекс величин, який згодом був названий на честь його імені – числом (або критерієм подібності) Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} \quad (8)$$

Для прямих гладких циліндричних труб експериментально встановлено такі межі:

1. $Re \leq 2320$ – режим руху ламінарний;
2. $Re \geq 10^5$ – режим руху турбулентний;

3. $2320 < Re < 10^5$ – перехідний режим: нестійкий ламінарний режим.

Для оцінки гідродинамічних режимів течії рідин по каналах інших перетинів відмінних від циліндричних згодом було введено поняття гідравлічного радіуса r_r і еквівалентного діаметра d_e .

Гідравлічний радіус r_r визначається наступним відношенням:

$$r_r = \frac{f}{\Pi} \quad (9)$$

Якщо застосувати наведену формулу для циліндричного перетину, для якого $f = \pi d^2/4$ і $\Pi = \pi d$, то отримаємо, що для круглої труби її еквівалентний діаметр дорівнює учетверенному гідравлічному радіусу:

$$d_e = \frac{4f}{\Pi} \quad (10)$$

За своїм фізичним змістом, еквівалентний діаметр є діаметр гіпотетичного перетину круглої форми. Іншими словами, для оцінки і характеристики режиму течії рідин в каналах будь-якої форми, відмінної від круглої, замість реального каналу використовують канал круглої форми з еквівалентним діаметром [3].

1.3 Рівняння суцільності потоку

Одне з основних співвідношень гідромеханіки – рівняння нерозривності (суцільності) – висловлює закон збереження маси рідини: при сталому русі рідини по закритому трубопроводу і відсутності витоків через нещільні з'єднання через кожний поперечний переріз трубопроводу в одиницю часу протікає одна і та ж вагова кількість рідини [8].

Для трубопроводів з розгалуженнями рівняння нерозривності відноситься відповідно до суми окремих потоків, що розгалужуються.

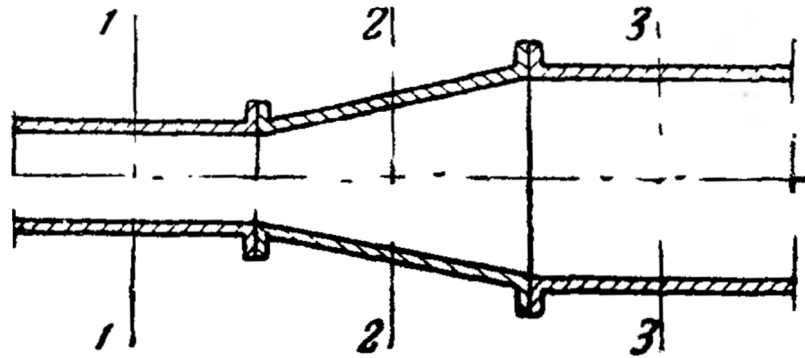


Рисунок 1.7 – До виведення рівняння суцільності потоку:
1 – 3 – перетини труби

Якщо позначити як G_1 , G_2 , G_3 вагу рідини, що протікає відповідно через перетини 1–1, 2–2 та 3–3, то рівняння суцільності може бути виражено:

$$G_1 = G_2 = G_3 = \text{const} \quad (11)$$

або

$$f_1 \omega_1 \gamma_1 = f_2 \omega_2 \gamma_2 = f_3 \omega_3 \gamma_3 = \text{const} \quad (12)$$

Для крапельних рідин (що не здатні до стискання), питома вага яких залишається незмінною за довжиною трубопроводу, рівняння суцільності приймає вид:

$$f_1 \omega_1 = f_2 \omega_2 = f_3 \omega_3 = \text{const} \quad (13)$$

При неусталеному русі рідини її фізичні характеристики безперервно змінюються у часі.

Рівняння суцільності потоку для неусталеного руху рідини, що стискається, може бути сформульовано наступним чином: зміна маси рідини, що міститься в даному об'ємі і що проходить через кожний поперечний переріз трубопроводу, відбувається тільки за рахунок зміни її щільності в цьому об'ємі.

Якщо рідина нестискувана, то щільність її по довжині трубопроводу (в напрямку осей dx , dy , dz) також не змінюється, і рівняння нерозривності потоку буде виражатися так:

$$\frac{d\omega_x}{dx} + \frac{d\omega_y}{dx} + \frac{d\omega_z}{dx} = 0 \quad (14)$$

де $\frac{d\omega_x}{dx}$, $\frac{d\omega_y}{dx}$, $\frac{d\omega_z}{dx}$ – зміна швидкості за напрямом відповідних осей координат [2].

1.4 Рівняння Бернуллі

Закон збереження енергії для рідини, що рухається, виражається перетвореним рівнянням Ейлера:

$$dP - \rho(Xdx + Ydy + Zdz) + \frac{\rho}{2} d\omega^2 = 0 \quad (15)$$

Уявімо собі рух елементарного струмка сталого потоку рідини під дією однієї єдиної масової сили – сили тяжіння, тобто $X=0$, $Y=0$ и $Z=-g$ (рисунок 1.8). У цьому випадку рівняння (15) набуває такого вигляду:

$$dP + \rho g dz + \frac{\rho}{2} d\omega^2 = 0 \quad \text{або} \quad d\left(P + \rho g z + \frac{\rho}{2} \omega^2\right) = 0 \quad (16)$$

В кінцевому підсумку, враховуючи, що нулю може дорівнювати диференціал тільки постійної величини, то після невеликих перетворень, рівняння (16) може бути представлено у вигляді:

$$\frac{P}{\rho g} + z + \frac{\omega^2}{2g} = H = \text{const} \quad (17)$$

Отримане рівняння в гідродинаміці відоме як рівняння Бернуллі для ідеальної рідини. По суті, рівняння Бернуллі являє собою основний той же закон гідростатики, але доповнений ще одним членом. Фізичний сенс рівняння Бернуллі полягає в тому, що воно виражає закон збереження енергії рухомої рідини: сума потенційної і кінетичної енергії є величина постійна.

Перший член рівняння $\frac{P}{\rho g}$ – статичний, або п'єзометричний натиск, рівний тиску стовпа рідини над даним рівнем, щодо точки відліку, висловлює

питому енергію тиску в цій точці; другий z – нівелірна висота, або геометричний напір, який дорівнює геометричній висоті даної точки і який висловлює питому потенційну енергію положення точки. Третій доданок $\frac{\omega^2}{2g}$ – швидкісний (динамічний) натиск, який виражає питому кінетичну енергію в даній точці («питома» енергія означає енергію, віднесену до одиниці ваги рідини) [9].

Визначення рівняння Бернуллі: для сталого потоку рідини для будь-яких довільно взятих перетинів потоку (або точок) сума потенційної $\left(\frac{P}{\rho g} + z\right)$ та кінетичної енергій $\left(\frac{\omega^2}{2g}\right)$ залишається величиною сталою.

Із закону Бернуллі випливає, що при зменшенні перерізу потоку, через зростання швидкості, тобто динамічного тиску, статичний тиск падає. Явище зниження тиску при збільшенні швидкості потоку лежить в основі роботи різного роду витратомірів (наприклад труба Вентурі), водо- і пароструминних насосів.

Закон Бернуллі справедливий в чистому вигляді тільки для рідин, в'язкість яких дорівнює нулю. Для наближеного опису течій реальних рідин в технічній гідромеханіки (гідравліки) використовують інтеграл Бернуллі з додаванням доданків, що враховують втрати на місцевих і розподілених опорах.

Для сталого потоку ідеальної рідини для двох його довільно взятих перетинів (напр. перетинів II і II-II на рисунку 1.8) рівняння Бернуллі можна записати в такий спосіб:

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} = \text{const} \quad (18)$$

Для горизонтального каналу ($Z_1=Z_2$) рівняння Бернуллі істотно спрощується і набуває наступний вид:

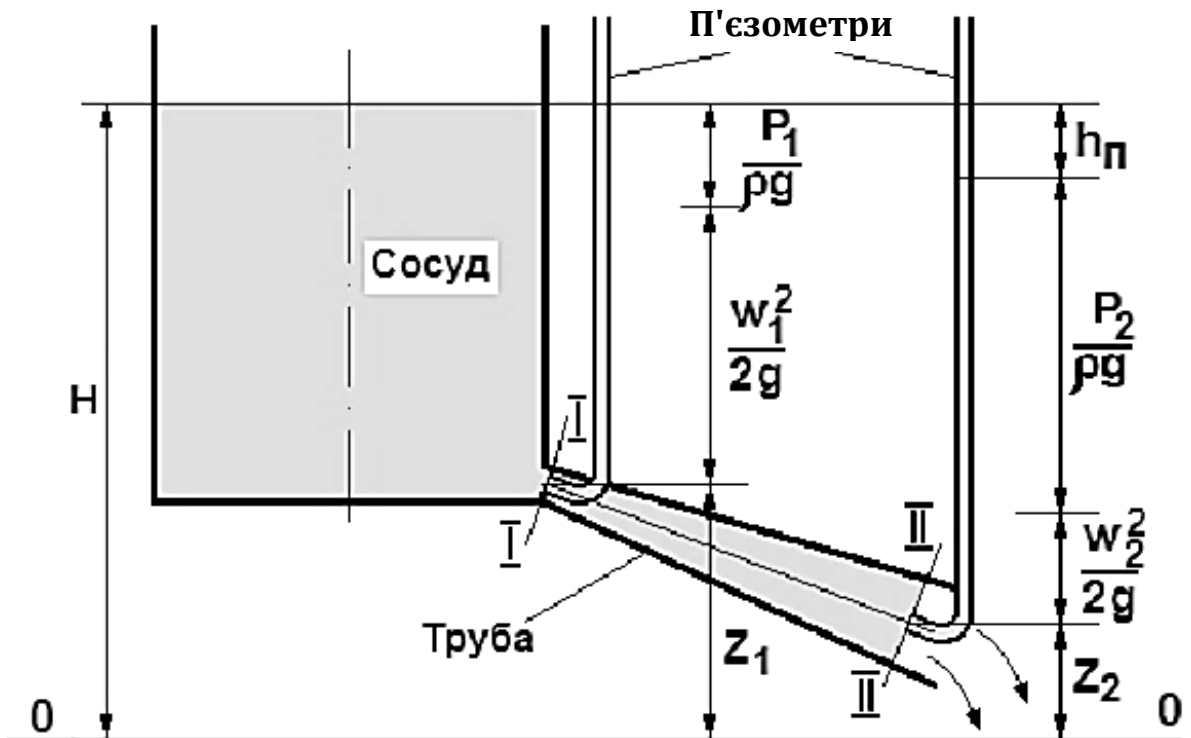


Рисунок 1.8 – Ілюстрація рівняння Бернуллі

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} = \text{const} \quad (19)$$

Аналіз рівнянь (18) і (19) показує, що при зміні перетину (площі поперечного перерізу апарату або трубопроводу), і відповідно швидкості руху рідини, відбувається перетворення одного виду енергії в інший: при збільшенні швидкості частина потенційної енергії переходить в кінетичну, а при зниженні швидкості – навпаки, частина кінетичної енергії переходить в потенційну. При цьому їх сума залишається незмінною. Зазвичай використовується такий вислів: де вище швидкість, там менше тиск, і навпаки.

При русі реальної рідини, на відміну від ідеальної, її гідродинамічний напір, який визначається рівняннями (18) і (19), не залишається постійним. Оскільки реальна рідина має в'язкість, а так само те, що на шляху руху рідини реальний канал, як правило, оснащено різними кранами, вентилями, поворотами тощо, то частина енергії рухомої рідини витрачається на подолання всіх цих опорів. Всі ці опори прийнято називати гідравлічними

опорами. Частина цієї енергії перетворюється в тепло, яке витрачається на нагрівання рідини, а частина – розсіюється в навколишнє середовище. І тоді, рівняння Бернуллі, для характеристики руху реальної рідини зазнає деякі зміни і буде мати наступний вигляд:

$$\frac{P_1}{\rho g} + Z_1 + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 + \frac{\omega_2^2}{2g} + h_{\pi} \quad (20)$$

Для руху реальної рідини сума статичного і динамічного напорів, нівелірної висоти і втраченого напору залишається величиною постійною і дорівнює повному гідродинамічному напору H .

Величина енергії, яка визначає втрачений напір, складається з витрат енергії на подолання сил тертя $h_{\text{тер}}$ і сил місцевого опору $h_{\text{м}}$ (дивись розділ 1.6) [3]:

$$h_{\pi} = h_{\text{тер}} + h_{\text{м}} \quad (21)$$

Рівняння Бернуллі має дуже велике значення для практичних розрахунків: за допомогою рівняння розраховуються такі характеристики, як необхідний напір для забезпечення руху рідини в заданому режимі з даного каналу, швидкість руху, час руху тощо. Крім того, за допомогою даного рівняння проводиться розрахунок і створення вимірювальних приладів для визначення швидкості течії і витрат рідин (витратомірів), що є надзвичайно важливим з точки зору створення засобів контролю та автоматичного регулювання технологічними процесами [10].

1.5 Витікання рідини з ємності при постійному напорі

На практиці часто доводиться обчислювати витрату (кількість рідини, що витікає) для трубопроводу або судини. Такі завдання вирішуються за допомогою рівняння Бернуллі.

У разі витікання через отвір в дні посудини при постійному рівні рідини в посудині (рисунку 1.9) сила напору H витрачається на створення швидкості витікання ω_0 рідини і подолання опору в отворі.

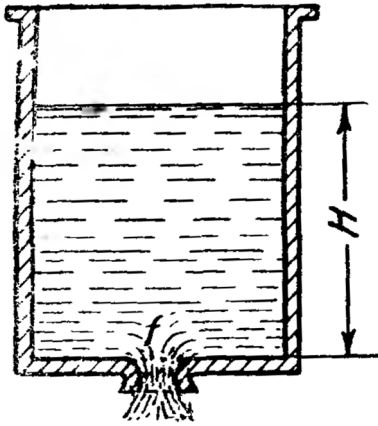


Рисунок 1.9 – Витікання рідини через отвір у дні посудини

Якщо цей опір відсутній, тобто відбувається витікання ідеальної рідини, то відповідно до рівняння Бернуллі весь статичний напір в отворі переходить в швидкісний:

$$H = \frac{\omega_0^2}{2g} \quad (22)$$

або

$$\omega_0 = \sqrt{2gH} \quad (23)$$

З останнього рівності видно, що швидкість витікання ω_0 рідини дорівнює швидкості падіння тіл з висоти H , тобто це рівність є не що інше, як відома формула Торічеллі.

Обсяг ідеальної рідини, яка витікає з посудини в 1 с, згідно з попереднім дорівнює:

$$Q = f\omega_0 \quad (24)$$

Практично, однак, кількість рідини, що витікає, менше обчисленого за цією формулою внаслідок стиснення струменя рідини в отворі (тобто зменшення її перетину) і тертя реальної рідини в отворі, через яке вона витікає.

Струмінь, що витікає з отвору, піддається на виході з посудини стисненню поперечного перерізу. Відношення площі поперечного перерізу струменя f_c до площі перетину отвору f , характеризує ступінь стиснення, називають коефіцієнтом стиснення струменя ε :

$$\varepsilon = \frac{f_c}{f} \quad (25)$$

Вплив сил тертя реальної рідини враховується коефіцієнтом швидкості φ , який в загальному випадку визначається рівністю:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta}} \quad (26)$$

З урахуванням стиснення струменя і сил тертя витрата рідини при витіканні визначається з виразу:

$$Q = \varphi \varepsilon f \sqrt{2gH} \quad (27)$$

або

$$Q = \mu f \sqrt{2gH} \quad (28)$$

де $\mu = \varepsilon \varphi$ – коефіцієнт витрати.

Для більшості випадків закінчення води з круглих отворів можна приймати $\mu = 0,62 - 0,63$ [2].

1.6 Гідравлічний опір зрошувача

Місцеві втрати напору h_m викликаються в основному ударом рідини і змінами в напрямку її течії по проходженні через звуження тракту, запірно-регулюючу арматуру, коліна, трійники тощо, а втрати напору по довжині тракту $h_{тер}$ обумовлені тертям рідини об поверхню стін.

Величину h_m висловлюють в функції від швидкості за місцевим опором [11]:

$$h_m = \zeta \frac{\omega^2}{2g} \quad (29)$$

Типи місцевих опорів та середні значення коефіцієнту опору ζ , що найчастіше зустрічаються при розрахунку трубопроводів насадкових колон, наведені у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1– Середні значення безрозмірного коефіцієнту опору ζ

Тип місцевого опору	Значення ζ
1	2
Вхід в трубу:	
без заокруглення вхідних крайок	0,5
при добре заокруглених крайках	0,1
Вихід з труби в посудину більших розмірів	1,0
Різкий поворот труби без перехідного заокруглення при куті повороту $\approx 90^\circ$	1,25–1,5
Коліно (плавне заокруглення) на трубі з кутом 90° :	
при $R_3 \geq 2d$	0,5
при $R_3 \approx (3 \div 7)d$	0,3
Засувка при середньому відкритті	2,0
Відкрита засувка	0,10
Вхід у всмоктувальну коробку зі зворотним клапаном	5–10

У загальному вигляді втрати тертя за довжиною тракту $h_{\text{тер}}$ можна визначити за формулою:

$$h_{\text{тер}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\omega^2}{2g} \quad (30)$$

При наближених розрахунках $\lambda=0,03$. При більш точних розрахунках величина λ береться в залежності від числа Re і ступеня шорсткості стінок трубопроводу.

Для круглих циліндричних труб [12]:

$$Re = \frac{\omega d \rho}{\mu} = \frac{\omega d}{\nu} \quad (31)$$

1.7 Розподіл рідини зрошувачами

Розподільник рідини має визначальний вплив на ефективність роботи насадок колон [13, 14, 15, 16]. При експлуатації цих колон одним з основних засобів впливу на процес зазвичай є зміна режиму роботи зрошувача або заміна одного зрошувального пристрою іншим.

Технологічні параметри скрубберного процесу, конструкція і габаритні розміри колони істотно впливають на вибір типу розподільника рідини і на його конструктивне виконання. Основними факторами при цьому є:

- витрата зрошувальної рідини;
- витрата і середня швидкість газу в апараті;
- допустимість віднесення бризок газом в сусідні апарати, системи або в атмосферу;
- необхідність регулювання витрати;
- внутрішній діаметр апарату, тип і розміри його насадки, а також потрібна для розміщення зрошувача висота наднасадкового простору;
- розташування штуцерів виведення газу з апарату (збоку колони або на її кришці);
- форма кришки і розташування газового штуцера на ній (центральне або периферійне).

Крім того, при виборі типу зрошувача необхідно враховувати простоту його виготовлення, монтажу і ремонту, корозійні властивості і чистоту рідини, її фізичні властивості (в основному в'язкість), а також можливість зниження витрат енергії на подачу рідини до зрошувачу.

Крім цих факторів в деяких випадках слід враховувати спосіб розташування керамічних кілець [17] та інших насадок [18, 19, 20], можливість зонального збільшення кількості зрошувальної рідини (наприклад, в центрі торця насадки або, навпаки, неприпустимість зон зрошення з локально збільшеною кількістю рідини на них, а також необхідність застосування напірних бачків – витратомірів, розміщених на кришці вежі або всередині колони пристроїв для живлення великогабаритних зрошувачів [21]. Іноді на вибір і конструктивне виконання зрошувача впливають кон'юнктурні обставини, такі як необхідність виготовлення

зрошувача на місці з наявних матеріалів, тип, продуктивність і характеристика наявних насосів тощо.

Застосовувані зрошувальні пристрої можна розділити на дві групи: пристрої, що працюють за принципом вилування з них необробленої рідини (короткоструменеві зрошувачі) і працюють за принципом роздачі роздроблених струменів підвищеної протяжності.

Відзначимо, що дальність польоту р струменів скрубберних зрошувачів другої групи зазвичай не перевищує 3 – 4 м. При цьому вже при 0,5 – 1,0 м спостерігається інтенсивне утворення крапель в результаті вільного розпаду низьконапірних ($H = 1 - 3$ м) циліндричних і плівкових струменів, а також утворення вторинних крапель при зустрічі крапель струменя з поверхнею насадки апарату.

Були випробувані способи подачі компактних і роздроблених струменів як при додатковому шарі невпорядкованих кілець, так і без нього (рисунок 1.10), а також деякі специфічні випадки зрошення (рисунок 1.11). Досліди проводили на системі аміак – вода. Для розподілу рідини застосовувався трубчастий двукільцевий колектор, внутрішнє (основне) кільце якого радіусом $R = D / 4$ мало вісім циліндричних патрубків закінчення, а зовнішнє кільце радіусом $R = D / 2$ мало шістнадцять таких же патрубків і застосовувалося для зрошення пристінної зони торця насадки і самих стін досліджуваної колони. У дослідах до патрубків внутрішнього кільця приєднували подовжувальні трубки, заглиблюється в шар насадки колони, а при оцінці впливу способу розбризкування всієї зрошувальної рідини під патрубками цього кільця на насадці розміщували невеликі відбивні розетки.

Дослідженнями і практикою експлуатації встановлено істотний вплив зрошувачів на роботу насадкових колон; слід зазначити, що зрошувачі вивчені мало (зокрема, за показниками масопередачі, що переважно їх і

характеризує), а експериментальні дослідження, присвячені порівняльній оцінці зрошувачів (обох згаданих груп) вкрай рідкісні.

Як видно з рисунку 1.10, зі збільшенням точкової витрати рідини ефективність насадки апарату зростає. При постійній витраті Q розбрикування рідини (криві 1 і 2) призводить до збільшення значень коефіцієнтів абсорбції, причому в разі більш інтенсивного розбрикування (розетками) значення K_r трохи вище.

$K_r, \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{год} \cdot \text{ат})$

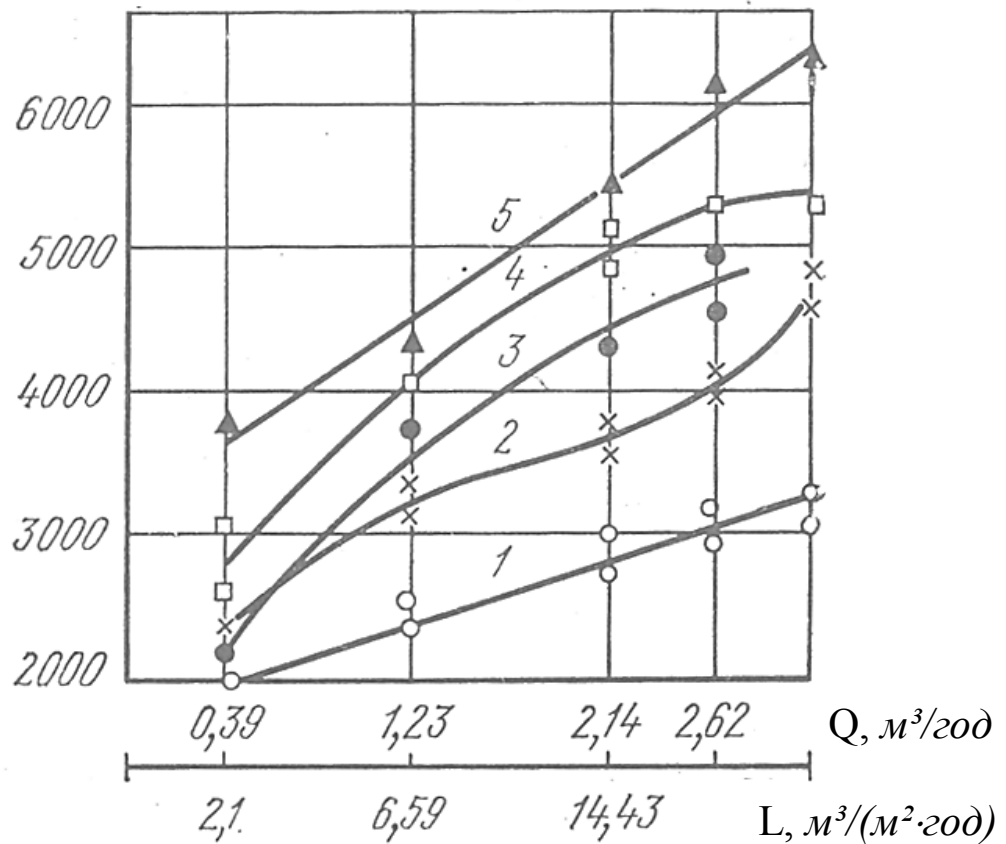


Рисунок 1.10 – Залежність об'ємного коефіцієнта абсорбції K_r від способу зрошення (подача рідини в восьми точках):

Q – витрата; L – щільність зрошення;

1 – подача рідини без розбрикування, 2 – розбрикування на кільця насадки, 3 – розбрикування плоскими відбивачами; 4 – подача рідини трубками, заглиблені в додатковий шар кільце навалою; 5 – розбрикування рідини по додатковому шару

$K_r, \text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{год} \cdot \text{ат})$

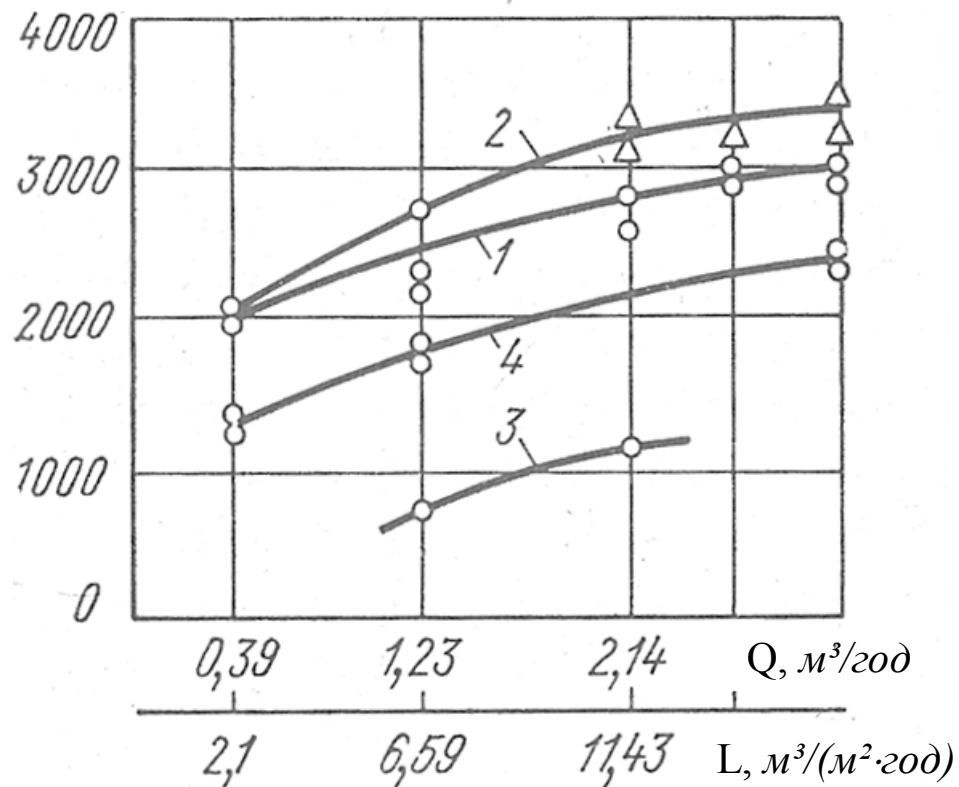


Рисунок 1.11 – Залежність об'ємного коефіцієнта абсорбції K_r від способу зрошення периферійних зон торця насадки:

1 – вісім точок зрошення пристінної зони; 2 – шістнадцять точок зрошення пристінної зони; 3 – чотири точки зрошення на довжині дуги $\pi/4$ пристінної зон; 4 – зрошення стін колони

Найбільш ефективно при будь-якій щільності зрошення застосування регулярної насадки спільно з шаром підсіпки кілець навалом як в умовах точкової подачі рідини заглиблені в цей шар трубками, так і особливо при розбризуванні рідини по кільцях шару (криві 4 і 5). Це вказує на ефективність застосування розбризкуючих зрошувачів в промислових вежах.

При експлуатації центрально встановлених обертових розпилювачів (так званих зірочок), так само як і при груповій установці зрошувачів, що не обертаються (розеток тощо), часто виникає посилене зрошення пристінної зони торця насадки і безпосередньо верхньої частини стін колони, а при

невертикальній осі зірочки або неправильному підводі суміші до ребер, що розбризкують рідину, відбувається лише часткове зрошення пристінної зони.

З графіка рисунок 1.11 видно, що дворазове збільшення числа точок зрошення периферійної зони призводить до збільшення коефіцієнтів абсорбції приблизно на 20%, а при зрошенні самих стін колони тією ж кількістю рідини (відігнутими трубками, приєднаними до насадок зовнішнього колектора) значення K_r помітно знижуються. Ці дані свідчать про недоцільність зрошення розбризкувачами стін наднасадкового простору, якщо при зрошенні колони досягається повна змоченою пристінної зони торця насадки і відповідно всієї насадки, що лежить під цією зоною. Часткове зрошення периферійної зони, подібне спостерігається при великому перекосі обертових розпилювачів (в дослідях на довжині дуги $\pi/4$) різко знижує об'ємний коефіцієнт абсорбції насадки апарату.

Як показують експерименти, початкові умови розподілу рідини істотно впливають на роботу насадкових колон. При цьому можливе ефективне застосування двох різних способів розподілу, якими і визначається область застосування тих чи інших зрошувачів, їх конструктивне виконання і методи розрахунку: «точкова» подача потоків необробленої рідини і зрошення за допомогою роздроблених на бризки струменів, при якому можна отримати повну або близьку до повної змоченість торця насадки [11].

1.8 Зрошувачі, які не розбризкують рідину

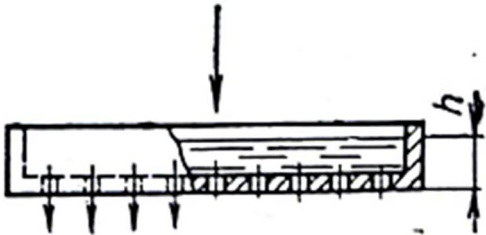
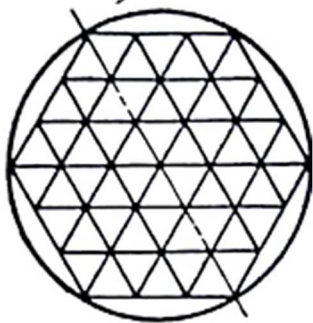
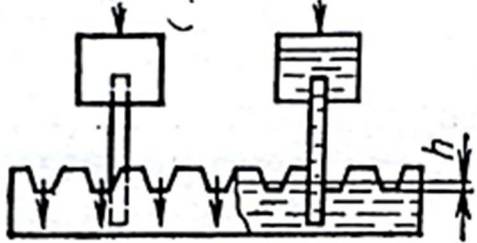
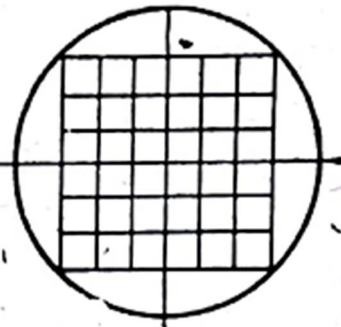
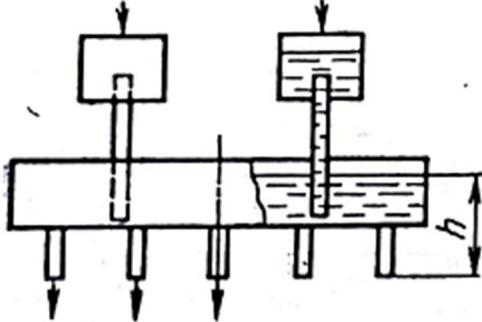
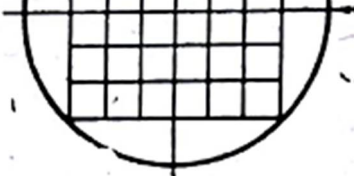
При точковій подачі потоків неподрібненої рідини досить просто здійснити їх рівномірний розподіл за всією зрошуваною поверхнею. Таке зрошення насадкових колон доцільно як при обмежених витратах рідини, так і в тих випадках, коли унесення бризків рідини газом з апарату небажане або неприпустиме. Для запобігання таким явищам необхідна установка

спеціальних краплевловлювальних пристроїв, часто громіздких та з великим гідравлічним опором.

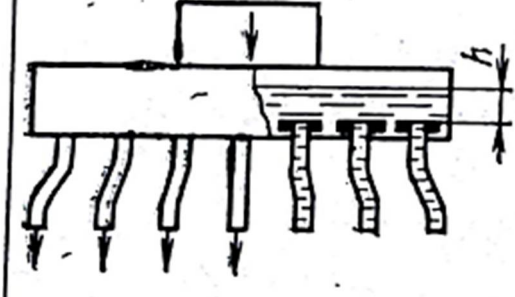
В таблиці 1.2 дані схеми зрошувачів, що не розбризкують рідину, та створені ними сітки зрошення.

Зрошувачі типу плит розподіляють рідину по більш заповненій трикутній сітці, а жолоби і багатотрубчаті зрошувачі внаслідок особливостей їх конструкції розподіляють її по менш густій квадратній сітці.

Таблиця 1.2 – Основні схеми зрошувачів, що не розбризкують рідину, та схеми розподілення точок зрошення

Найменування зрошувача	Схема зрошувача	Схема розподілення точок зрошення
1	2	3
Розподільні плити		
Жолоби з боковими прорізами		
Жолоби з донними патрубками		

Продовження табл. 1.2

1	2	3
Багатотрубчаті зрошувачі		

При надмірно високих напорах внаслідок удару струменя об насадку все ж може з'явитися невелика кількість бризків, що уносяться газом, тому нерозбризкуючі зрошувачі встановлюють, як правило, поблизу торця насадки або безпосередньо на ній, а робочий напір H приймають якомога меншим. Щоб повністю уникнути утворення бризок в місці падіння струменів рідини на насадку, застосовують жолоби або плити переливного дії, струмені яких досить повільно виливаються через переливи при дуже невеликому натиску ($H = 5 - 12$ мм). При цьому після проходження порогу переливу струмені притискаються до зовнішньої стінки жолоба або до внутрішньої стінки патрубку плити і перетікають на насадку без розбризкування.

Вибір числа точок зрошення і витрати рідини в кожній точці зрошення мають велике значення для забезпечення ефективної роботи колони. Для ефективної роботи всієї насадки і запобігання проривів газу через слабозрошувані ділянки число точок зрошення, сітка їх розташування, а також витрата рідини в кожній точці повинні вибиратися так, щоб при розтіканні рідини всередині верхніх шарів кілець досягалася як повна змоченість деякого поперечного перерізу, паралельного торця насадки, так і досить інтенсивне зрошення всього змочуваного перетину. Цю площину можна назвати головним зрошуваним перетином, причому для більш повного використання верхніх шарів насадки апарату головний переріз повинен знаходитися на мінімальній відстані від рівня торця насадки [11].

Проведено стендові випробування кілець Рашига промислового розміру (50X50 мм) при їх регулярному укладанні і засипці навалом в колоні діаметром 500 мм і одній точці подачі зрошення [22]. Знайдено, що контур розтікання рідини, що створюється одним точковим джерелом, близьким до заповненого рідиною параболоїда з вершиною параболу в точці подачі рідини.

Розкриття контуру потоку, тобто діаметр d його поперечного перетину, визначається в основному витратою рідини q , розміром кілець і способом їх укладання в апараті. Фізичні властивості рідини (питома вага і в'язкість, що змінювалися в дослідах в 1,97 і 27 разів відповідно) на d практично не впливають. На кільцях навалом розтікання практично припиняється на відстані 0,7 – 1,0 м, а на укладених кільцях дещо раніше: при 0,5 – 0,6 м.

Отримані дані з протяжності радіально розширюється потоку, що радіально розширюється, підтверджуються [23], згідно з якою для регулярно укладених кілець Рашига 50x50 і 80x80 мм збільшення відстані понад 0,8 – 0,9 м не призводить до помітного зростання частки змоченої поверхні. Показано також, що швидкість газового потоку не впливає помітно на величину d .

Як видно з вищевказаних дослідів, а також проведених випробувань кілець Рашига 50x50, 80x80 і 100x100 мм [24], повна змоченість поперечного перетину насадки досягається лише всередині її верхніх шарів на відстані 0,6 – 1,0 м від поверхні рівня насадки і за умови, що сітка точок подачі зрошення обрана досить густою.

Контур одиничного рідинного потоку, що розтікається на регулярно укладених кільцях і кільцях навалом, показаний на рисунку 1.12, а. Збільшення витрат рідини в точці подачі зрошення від q_1 (показано точками) до q_2 призводить в обох випадках до радіального розширення потоку, більш інтенсивному при застосуванні кілець навалом (цей потік, природно, не є

суцільним і його порозність визначається в основному діаметром кілець шару і величиною q). Випробування великих кілець Рашига 100x100 мм (рисунок 1.12, б) показали монотонне зростання діаметра поперечного перерізу потоку у всьому інтервалі випробування витрат рідини q для випадку кілець навалом (крива I) і досить швидку стабілізацію значень d (крива II) в разі застосування регулярного укладання тих же кілець (радіальне розтікання рідини по такому шару ускладнене).

Аналіз даних по розтіканню (рисунок 1.12 а і б) дозволяє зробити важливий висновок про суттєвий вплив діаметра зони d (і окремо приросту радіусу зрошення цієї зони при збільшенні q і крупності кілець) на ступінь змочування поперечного перерізу насадки.

Для кривих розтікання рідини по кільцях Рашига (рисунок 1.12 та 1.13) характерно наступне:

- при всіх витратах рідини величина d для шару кілець навалом більше, ніж для шару упорядкованих кілець;
- більшим кільцям неупорядкованих і регулярних шарів властива і велика розподільча здатність;
- для упорядкованих кілець і кілець навалом характерна наявність точки перелому в ході кривих при деякій, неоднаковій для різних кілець, кількості зрошеної рідини q , причому для укладених кілець за цією точкою радіальне розширення потоку практично припиняється [11].

Для проектування і розрахунку зрошувальних пристроїв важлива оцінка впливу числа точок зрошення насадки апарату, заснована на вимірі коефіцієнтів масопередачі. Такі роботи проводились дослідниками зазвичай в колонах невеликого діаметру. У досліджах [17, 25] визначали вплив числа точок зрошення на об'ємний коефіцієнт абсорбції K_T аміаку водою з суміші його з повітрям в колоні діаметром 500 мм, насадженої регулярно

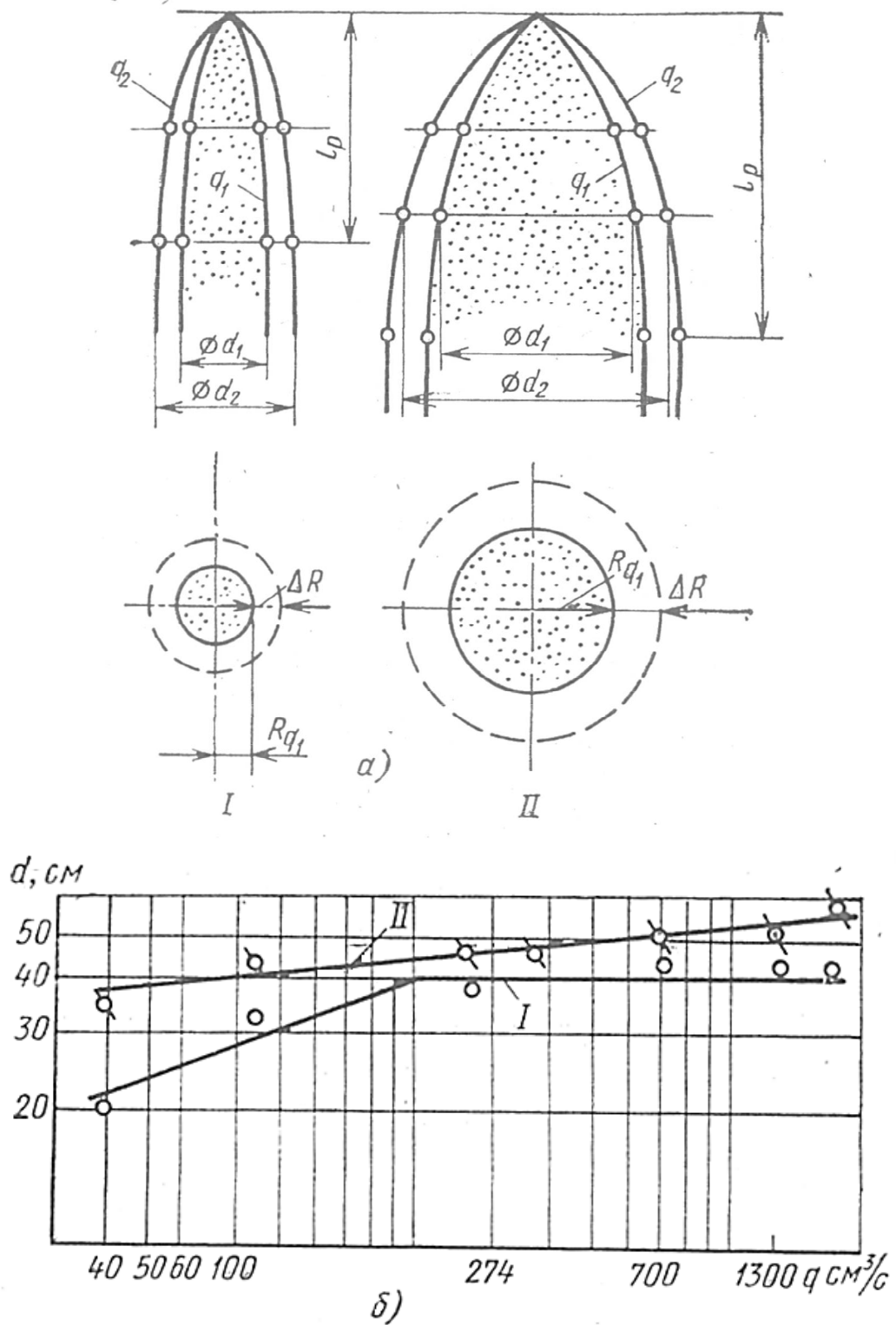


Рисунок 1.12 – Контури розтікання рідини:

- а – схеми розтікання: q_1, q_2 – витрата в точці зрошення, $q_1 < q_2$, L_p – довжина контура, (I – кільця в укладку, II – кільця навалом)
- б – діаметр d контура розтікання рідини на кільцях Рашига 100x100 мм (I – регулярні кільця, II – навалом)

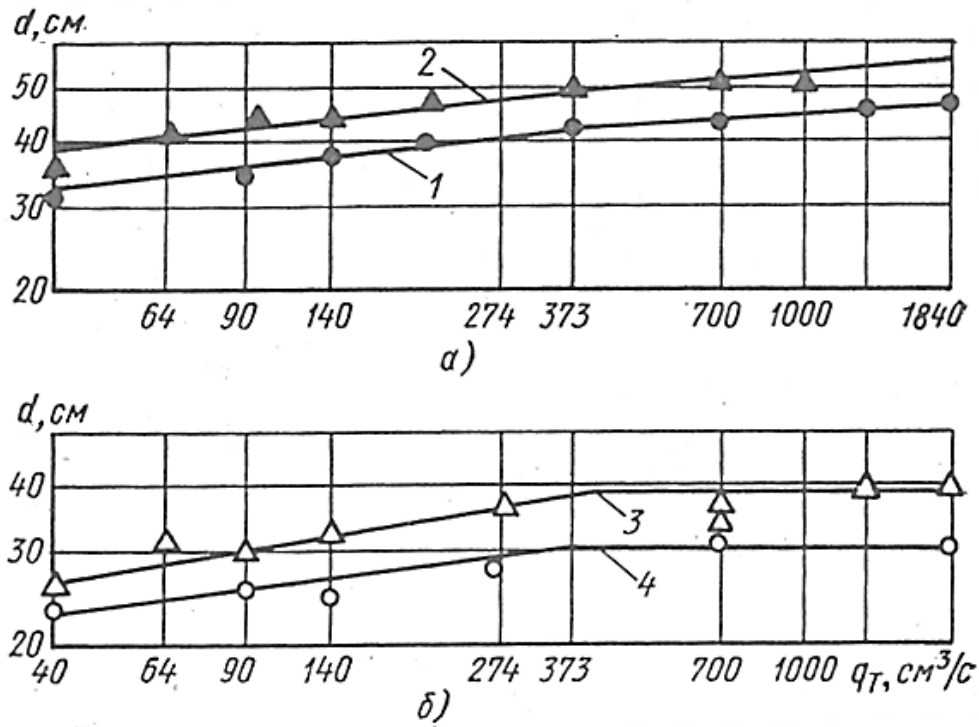


Рисунок 1.13 – Залежність d змоченої зони на виході з шару кілець

Рашига від витрати q_v точки подачі рідини:

а – неупорядкована насадка ($h=900$ мм), б – регулярна насадка;

1, 4 – кільця 50x50 мм, 2 – кільця 80x80 мм,

3 – кільця 80x80 мм, $h=880$ мм.

укладеними і засипаними навалом кільцями Рашига різного розміру. У цій же колоні проводили досліди по впливу числа точок зрошення при десорбції CO_2 з води повітрям. Були випробувані регулярно укладені шари насадки кілець Рашига 50x50 мм висотою 1600 і 6000 мм.

Результати досліджень показали, що при одному і тому ж числі-точок зрошення коефіцієнт ефективності використання насадки зростає зі збільшенням розміру упорядкованих кілець і кілець навалом. Це узгоджується з даними по збільшеній розподільчій здатності великих кілець (рисунок 1.12, а і рисунок 1.13). При шарі кілець навалом (висотою до 1,5 м) необхідні значення коефіцієнта ефективності використання насадки досягаються і при зменшеній кількості точок подачі зрошення, що також узгоджується з результатами дослідів по розтіканню рідини на неупорядкованих кільцях.

2 НОВИЙ ЗРОШУВАЧ РІДИНИ СИФОННОГО ТИПУ ЗА ПАТЕНТОМ УКРАЇНИ №60720

Зрошувачі застосовують у хімічній промисловості, металургії, харчовій промисловості та інших галузях.

Відомий сифонний зрошувач рідини, що містить мірну ємність та сифонну трубку, висхідна ділянка якої виконана гнучкою, а вхідний отвір сифонної трубки розташований в поплавку, що змонтований з можливістю осьового переміщення в вертикальних напрямних, причому на вертикальних напрямних встановлені з можливістю переміщення та фіксації обмежувачі ходу поплавка [26].

На рисунку 2.1 зображено принципову схему сифонного зрошувача рідини та вид пристрою зверху.

Мірна ємність 1 є основним вузлом, що об'єднує решту деталей. Крім того, у мірній ємності акумулюється рідина перед її видаванням через сифонну трубку 2 у товарну ємність (на рисунку 2.1 товарну ємність умовно не показано).

Сифонна трубка 2 складається з жорсткої, поза мірної ємності (низхідної), та гнучкої, всередині мірної ємності (висхідної) ділянок.

Поплавок 3 кріпиться до висхідної ділянки сифонної трубки 2 і змонтований з можливістю осьового переміщення у вертикальних напрямних 4. В тілі поплавка 3 виконано канал, що зв'язує порожнину мірної ємності 1 із сифонною трубкою 2.

Положення вихідного отвору каналу та матеріал поплавка підбирається таким чином, щоб здійснювати відбір рідини з верхнього її шару. Коригування та більш точне налаштування може бути здійснене, наприклад, розташуванням зверху поплавка шайб.

Вертикальні напрямні 4 кріпляться до стінок мірної ємності 1 таким чином, щоб забезпечити вільне пересування поплавка 3.

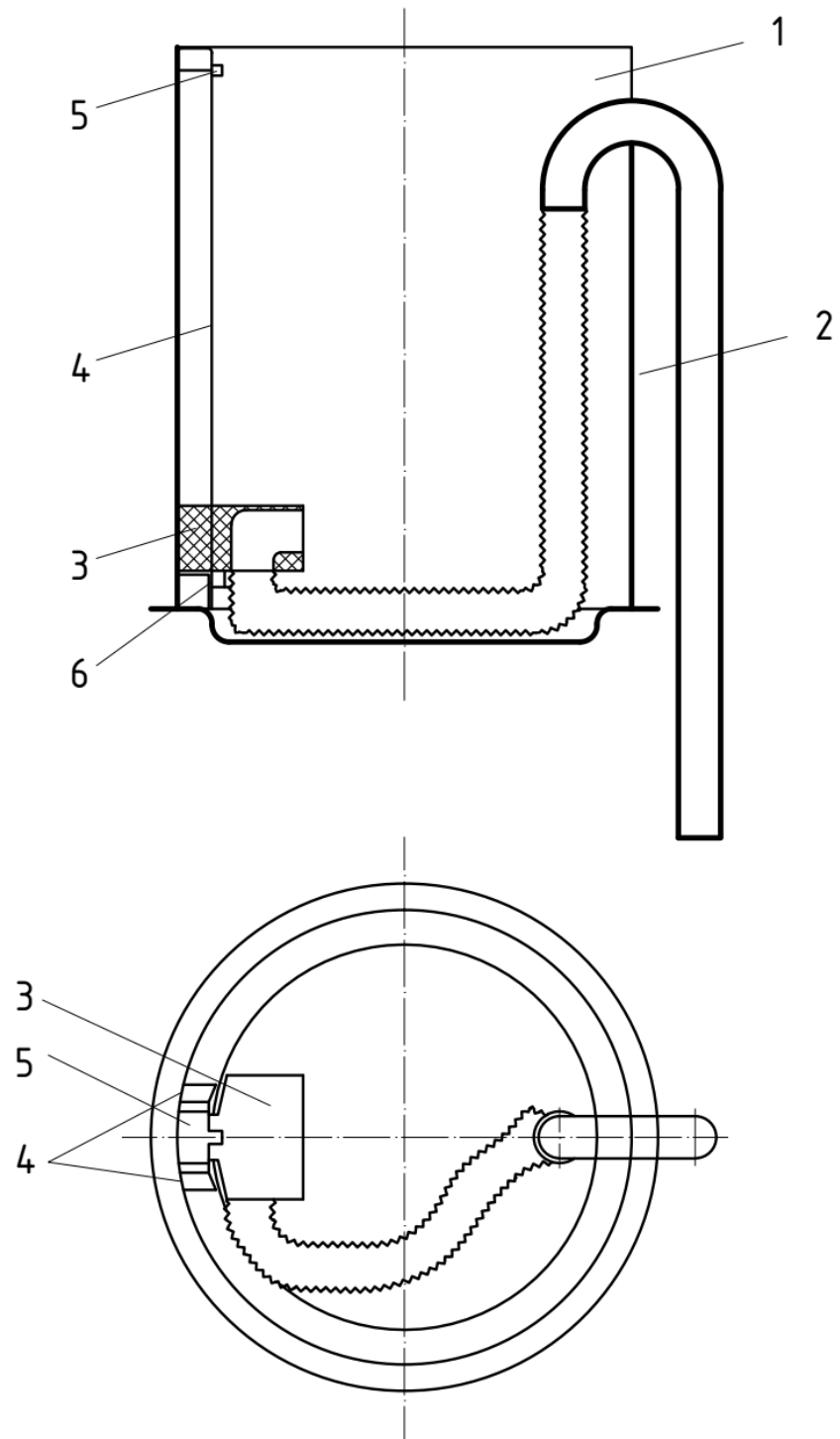


Рисунок 2.1 – Сифонний зрошувач рідини
за патентом України №82068:

1 – мірна ємність, 2 – сифонна трубка, 3 – поплавок, 4 – вертикальні напрямні, 5 – верхній обмежувач, 6 – нижній обмежувач

Обмежувачі ходу поплавка – верхній 5 та нижній 6 – фіксуються на вертикальних напрямних таким чином, щоб звужувати, при необхідності, пересування по вертикалі поплавка під час наповнення та спорожнення мірної ємності 1. Конструктивно положення обмежувачів може змінюватись під час налаштування на видачу доз певного об'єму.

Сифонний зрошувач рідини працює наступним чином.

При увімкненні подавання рідини у мірну ємність 1 почнеться наповнення останньої. Час наповнення t_n залежить від встановленої витрати Q_n рідини через підвідний трубопровід. Наповнення мірної ємності є причиною підняття поплавка 3, який зв'язаний з сифонною трубкою 2, вздовж вертикальних напрямних 4. Підняття поплавка триває до моменту досягнення ним верхнього обмежувача 5. Заповнення мірної ємності 1 завершується перевищенням рівня рідини в ній верхньої точки горба сифонної трубки 2. Останнє викличе увімкнення сифонної трубки, по якій почнеться витікання рідини в товарну ємність з витратою Q_c , що перевищує витрату Q_n подавання рідини. Це визначить помірне зниження рівня вільної поверхні рідини в мірній ємності 1 з одночасним опусканням поплавка 3. Слід зауважити, що у випадку розташування обмежувача 5 нижче верхньої точки сифонної трубки 2 поплавок 3 почне опускатись лише після зрівняння з ним вільної поверхні рідини. Після досягнення поплавком нижнього обмежувача 6 зниження рівня рідини викличе відкриття для повітря вхідного отвору сифонної трубки. Через згаданий отвір в тілі поплавка повітря надійде в горб сифонної трубки 2 і розірве суцільність потоку рідини. Видача дози припиниться. Причому, положення нижнього обмежувача 6 визначає степінь спорожнення мірної ємності 1, а положення верхнього обмежувача 5 — час, протягом якого поплавок буде залишатись нерухомим з моменту спрацьовування сифонної трубки 2. В цілому, це буде визначати об'єм доз та період дозування.

Виходячи з вищенаведеного, перевагами запропонованого пристрою є можливість зміни об'єму доз плавно і в широкому діапазоні.

Недоліком цього сифонного зрошувача рідини є те, що він позбавлений важливої переваги – відсутності рухомих елементів; до того ж радіус вигину сифонної трубки залежить від її діаметра і матеріалу, що накладає обмеження на мінімальні габарити пристрою в цілому.

В основу поставлена задача вдосконалення сифонного зрошувача рідини з можливістю розширення прогнозованого діапазону сталої роботи.

Поставлена задача вирішується тим, що сифонний зрошувач рідини містить мірну ємність, трубопровід для підведення рідини з регулюючим вентилям, зливну трубу, закріплену в днищі ємності та ковпак, який нещільно оточує зливну трубу з утворенням кільцевого проміжку і підводить рідину з мірної ємності до зливної труби і, згідно корисної моделі, зливна труба і ковпак мають телескопічну конструкцію. При цьому днище мірної ємності та нижній зріз телескопічного ковпака, а також верхній зріз телескопічної зливної труби та кришка телескопічного ковпака між собою жорстко з'єднані. Проте завдяки телескопічним ковпаку та зливній труби конструкція має можливість осового переміщення без зміни оптимальної відстані між днищем мірної ємності і нижнім зрізом телескопічного ковпака, а також між верхнім зрізом телескопічної зливної труби і кришкою телескопічного ковпака.

На рисунку 2.2 показано сифонний зрошувач рідини. Сифонний зрошувач рідини, що складається з мірної ємності 1, трубопроводу 2 для підведення рідини з регулюючим вентилям 3, телескопічної зливної труби 4 і телескопічного ковпака 5, працює наступним чином.

Попередньо сифонний зрошувач рідини складено відповідно до розрахункових параметрів роботи. Встановлені оптимальні відстані між днищем мірної ємності 1 і нижнім зрізом телескопічного ковпака 5, а також

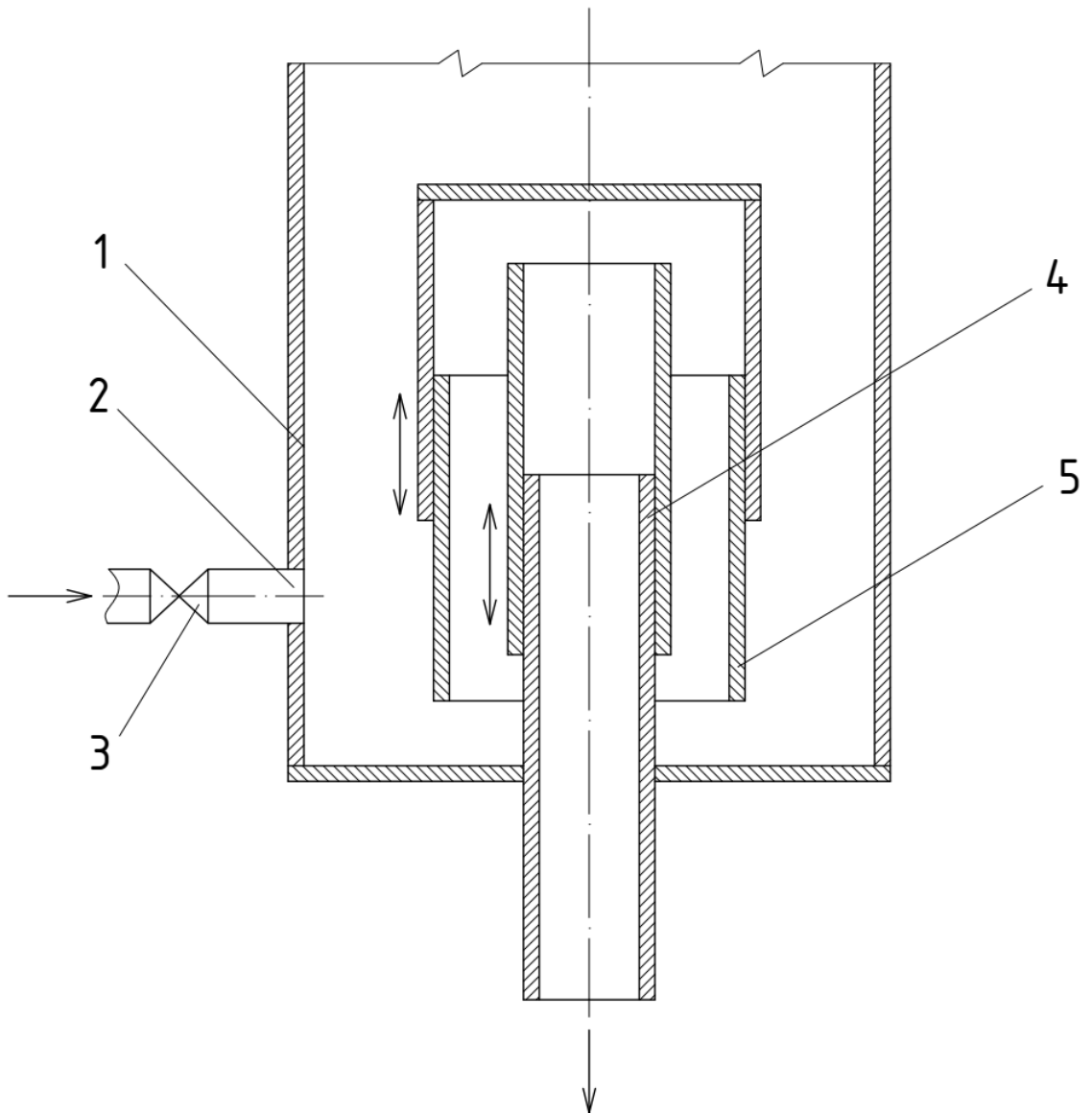


Рисунок 2.2 – Сифонний зрошувач рідини
за патентом України №60720:

1 – мірна ємність, 2 – трубопровід, 3 – регулюючий вентиль, 4 – телескопічна зливна труба, 5 – телескопічний ковпак

між верхнім зрізом телескопічної зливної труби 4 і кришкою телескопічного ковпака 5.

Рідину подають по трубопроводу 2 через регулюючий її витрату вентиль 3 в мірну ємність 1. Після наповнення рідиною мірної ємності 1 до рівня трохи вищого за висоту телескопічної зливної труби 4, почнеться часткове витікання рідини по стінках телескопічної зливної труби 4 до повного заповнення рідиною її поперечного перерізу. Сифонний зрошувач вмикається і далі витікає корисна доза рідини. Після досягнення рівня рідини в мірній ємності 1 нижнього зрізу телескопічного ковпака 5 газ надходить під кришку ковпака, струмінь рідини розривається і витікання дози припиняється. Сифонний зрошувач готовий до нового періоду витікання.

Зміна параметрів роботи здійснюється за допомогою переміщення по осьовій телескопічного ковпака 5, з яким одночасно переміщується телескопічна зливна труба 4. При цьому залишаються незмінними оптимальні відстані між днищем мірної ємності 1 і нижнім зрізом телескопічного ковпака 5, а також між верхнім зрізом телескопічної зливної труби 4 і кришкою телескопічного ковпака 5. Знані відстані дозволяють легко завбачити роботу сифонного зрошувача, оскільки місцеві коефіцієнти опору між днищем мірної ємності 1 і нижнім зрізом телескопічного ковпака 5, а також між верхнім зрізом телескопічної зливної труби 4 і кришкою телескопічного ковпака 5 залишаються без змінення. Для зручності користування телескопічний ковпак 5 може бути оснащений ручкою, а також пристроєм для фіксації положення всієї конструкції (на рисунку не показано).

Запропонований сифонний зрошувач рідини має розширений прогнозований діапазон сталої роботи, що дозволяє знизити витрати з праці і матеріалів при його уніфікації [27].

3 ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗРОШУВАЧА РІДИНИ СИФОННОГО ТИПУ

Попереднім дослідженням у роботі [28] визначені межі існування режимів роботи сифонного зрошувача, що склали:

$$Q_{\text{ВХ1}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{К}}}} \cdot 3,479 \cdot d_c^{5/2} \quad (32)$$

$$Q_{\text{ВХ2}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{К}}}} \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g \left(h_6 - \frac{h_5 - 2 \cdot h_4}{3} \right)} \quad (33)$$

Досліджувалась гідросистема – сифон (рисунок 3.1).

Знайдена область кількості рідини, що подається в ємність періодичного режиму, не свідчить про рівнозначність кожної точки області. Причина полягає в тому, що періодичний режим володіє залишковими властивостями доперіодичного і постперіодичного режимів. Вплив зазначених властивостей на періодичний режим залежить від наближення кількості рідини, що подається в ємність, до тієї чи іншої сполученої точки, при цьому вплив протилежного режиму стає менш істотним.

Час повного спорожнення ємності при періодичному режимі складається з часу часткового спорожнення і часу корисного спорожнення.

Час часткового спорожнення триває з моменту досягнення рідиною зігнутої частини сифонної трубки до моменту досягнення нею горизонту 1–1, величина якого визначається за рекомендаціями [29]. За нескінченно малий проміжок часу dt з ємності вибіжить об'єм рідини, що дорівнює:

$$Q_{\text{ВІХ}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{К}}}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(h - h_2)} dt \quad (34)$$

За той же проміжок часу dt в ємність надійде обсяг рідини, що дорівнює $Q_{\text{ВХ}} dt$. Звідси зміна обсягу рідини можна представити двома залежностями:

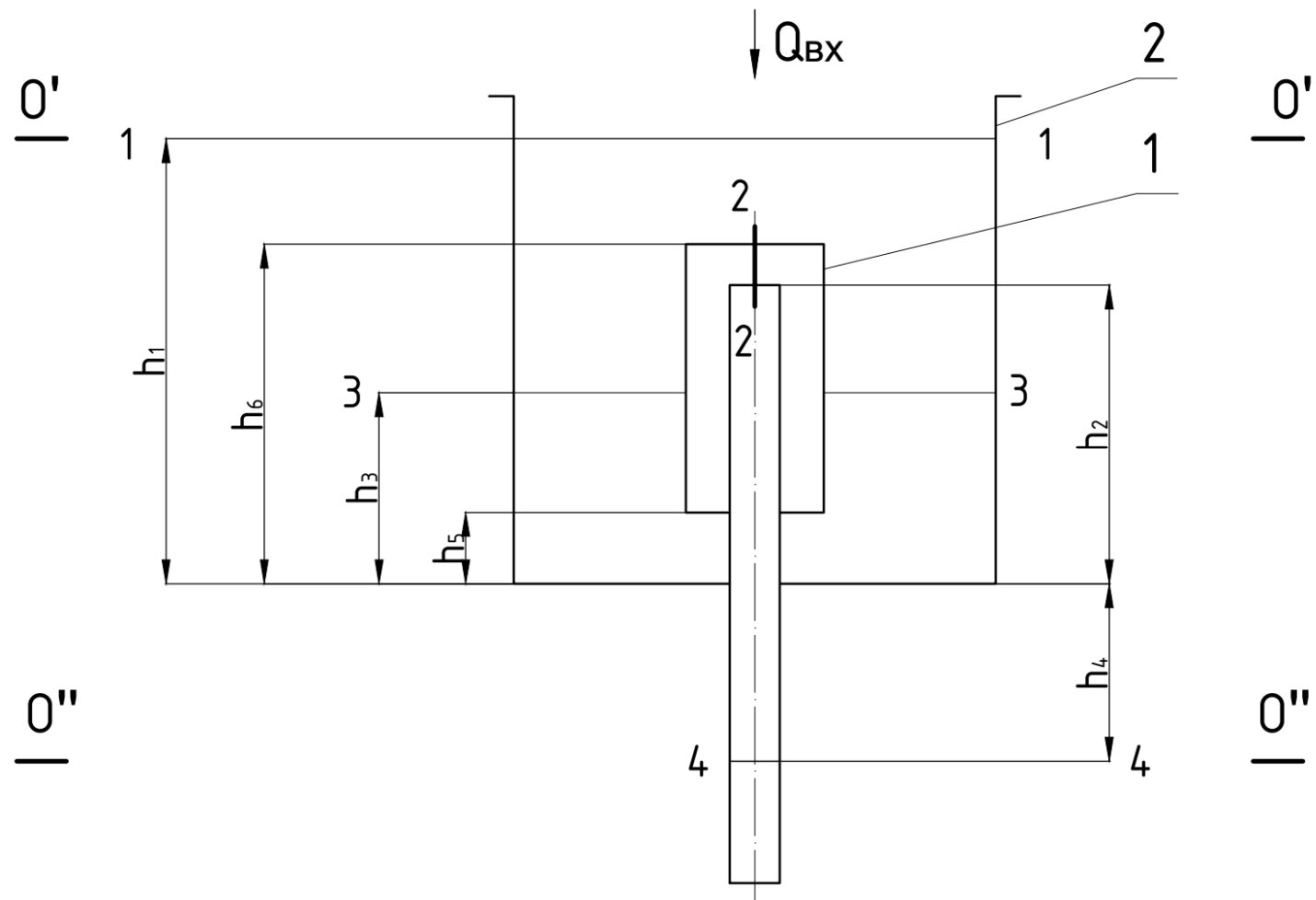


Рисунок 3.1 – Гідросистема – сифон:

1 – сифон, 2 – ємність періодичного режиму;

1–1, 2–2, 3–3, 4–4 – перетини; $O'-O'$, $O''-O''$ – площі порівняння

першою

$$dV = Q_{\text{BX}} dt - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(h - h_2)} dt \quad (35)$$

другою

$$dV = f_1 dh \quad (36)$$

Прирівнюючи праві часта рівнянь (35) і (36), отримаємо диференціальне рівняння

$$Q_{\text{BX}} dt - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(h - h_2)} dt = f_1 dh \quad (37)$$

Вирішуючи (37) щодо шуканого часу остаточно отримаємо

$$t_{\text{ч}} = -\frac{f_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 g} - \frac{f_1 Q_{\text{BX}}}{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}} \cdot f_2^2 g} \cdot \ln \left[Q_{\text{BX}} - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right] + \\ + \frac{f_1 Q_{\text{BX}}}{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}} \cdot f_2^2 g} \cdot \ln Q_{\text{BX}} \quad (38)$$

Обсяг рідини часткового спорожнення визначиться множенням рівняння (38) на Q_{BX} за вирахуванням об'єму $\approx S_1(h_1 - h_2)$, що утворюється внаслідок надлишку Q_{BX} . Разом

$$V_{\text{ч}} = -\frac{f_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \cdot Q_{\text{BX}}}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 g} - \frac{f_1 Q_{\text{BX}}^2}{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}} \cdot f_2^2 g} \cdot \ln \left[Q_{\text{BX}} - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}}} \cdot f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right] + \\ + \frac{f_1 Q_{\text{BX}}^2}{\frac{1}{1 + \xi_{\text{K}}} \cdot f_2^2 g} \cdot \ln Q_{\text{BX}} - f_1 (h_1 - h_2) \quad (39)$$

Момент закінчення часу часткового спорожнення є моментом початку часу корисного спорожнення, тривалість якого закінчується по досягненню горизонту рідини верхнього зрізу сифона, після чого відбудеться розрив струменя рідини [30]. За нескінченно малий проміжок часу dt з ємності витече обсяг рідини, що дорівнює

$$Q_{\text{ВІХ}} dt = \sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(3h - h_5 + 2h_4)} dt \quad (40)$$

За той же проміжок часу dt у ємність надійде обсяг рідини, що дорівнює $Q_{\text{ВХ}} dt$. Звідси зміну обсягу рідини можна представити двома залежностями:

першою

$$dV = - \left[Q_{\text{ВХ}} dt - \sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(3h - h_5 + 2h_4)} dt \right] \quad (41)$$

другою

$$dV = -f_1 dh \quad (42)$$

Прирівнюючи праві частини рівнянь (41) і (42), отримаємо диференціальне рівняння

$$\sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g(3h - h_5 + 2h_4)} dt - Q_{\text{ВХ}} dt = -f_1 dh \quad (43)$$

Вирішуючи його щодо шуканого часу, остаточно отримаємо

$$\begin{aligned} z = & \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} \cdot f_2 g} + \frac{f_1 Q_{\text{ВХ}}}{\frac{1}{1+\xi_c} \cdot 3f_2^2 g} \times \\ & \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{ВХ}} \right] - \\ & - \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} \cdot 3f_2 g} - \frac{f_1 Q_{\text{ВХ}}}{\frac{1}{1+\xi_c} 3f_2^2 g} \times \\ & \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_c}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{ВХ}} \right] \end{aligned} \quad (44)$$

Корисний об'єм рідини визначиться множенням рівняння (44) на $Q_{\text{ВХ}}$ і додаванням фіксованого об'єму рідини, рівному робочому об'єму ємності за вирахуванням об'єму сифонної трубки, що знаходиться в ємності. Разом

$$\begin{aligned}
V_K = & \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} Q_{BX}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} \cdot f_2 g} + \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_C} \cdot 3f_2^2 g} \times \\
& \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] - \\
& - \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} Q_{BX}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} \cdot 3f_2 g} - \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_C} 3f_2^2 g} \times \\
& \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] + V_\Phi \quad (45)
\end{aligned}$$

З сумісного розв'язання рівнянь (39) та (45) знаходимо дозу рідини періодичного режиму:

$$\begin{aligned}
V_D = & \frac{f_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} Q_{BX}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_K}} f_2 g} - \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_K} 3f_2^2 g} \cdot \ln \left[Q_{BX} - \sqrt{\frac{1}{1+\xi_K}} f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right] + \\
& + \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_K} f_2^2 g} \ln Q_{BX} - S_1(h_1 - h_2) + \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} Q_{BX}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} f_2 g} + \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_C} 3f_2^2 g} \times \\
& \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] - \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} Q_{BX}}{\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} 3f_2 g} - \\
& - \frac{f_1 Q_{BX}^2}{\frac{1}{1+\xi_C} 3f_2^2 g} \cdot \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1+\xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] + V_\Phi \quad (46)
\end{aligned}$$

Функція (46), отримана підсумовуванням функцій (39) і (45), має дві спрямовані вгору гілки. Ліва гілка функції (46) сформувалася, в основному, за рахунок об'єму рідини часткового спорожнення. За такої умови витікання крива залежності дози рідини від часу буде "розмазана" у часі. Права гілка

функції (46) сформувався, в основному, за рахунок корисного об'єму рідини. Її монотонне зростання зі збільшенням Q_{BX} свідчить про ймовірність переходу періодичного режиму до постперіодичного, що призводить до порушення стійкості періодичного режиму [31]. Таким чином, оптимальною кількістю рідини, що подається в ємність сифону при періодичному режимі, слід вважати мінімум функції (46). Для чисельного визначення цієї величини слід знайти похідну функції (46) за Q_{BX} і прирівняти нулю. Остаточо отримаємо [32].

$$\begin{aligned}
& -\frac{f_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{\sqrt{1 + \xi_K} f_2 g} - \frac{2f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_K f_2^2 g} \cdot \ln \left[Q_{BX} - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_K}} f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right] - \\
& -\frac{f_1 Q_{BX}^2}{1 + \xi_K f_2^2 g} \cdot \frac{1}{Q_{BX} - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_K}} f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}} + \frac{2f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_K f_2^2 g} \ln Q_{BX} + \\
& + \frac{2f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_K f_2^2 g} \cdot \ln Q_{BX} + \frac{f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_K f_2^2 g} + \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} Q_{BX}}{\sqrt{1 + \xi_C} f_2 g} + \\
& + \frac{2f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_C 3f_2^2 g} \cdot \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] + \frac{f_1 Q_{BX}^2}{1 + \xi_C 3f_2^2 g} \times \\
& \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX}} - \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)}}{\sqrt{1 + \xi_C} 3f_2 g} - \\
& - \frac{2f_1 Q_{BX}}{1 + \xi_C 3f_2^2 g} \cdot \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX} \right] + \frac{f_1 Q_{BX}^2}{1 + \xi_C 3f_2^2 g} \times \\
& \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{BX}} = 0
\end{aligned} \tag{47}$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЗРОШУВАЧА РІДИНИ СИФОННОГО ТИПУ

4.1 Опис схеми експериментальної установки та методика проведення експерименту

Експериментальне дослідження гідродинаміки сифона проводилося на установці, принципова схема якої представлена на рисунку 4.1. Вода подавалася на установку з водогінної мережі. Витрата води регулювався вентилем 1 і вимірювався попередньо відкаліброваним ротаметром 2 типу РМ. Ротаметр мав два поплавця: один для вимірювання витрати рідини в діапазоні від 0 до 3,5 л/хв, інший – в діапазоні від 3,5 до 10 л/хв. Далі рідина надходила в сифонну ємність 3, що представляла собою прямокутну скляну призму. Причому рідина подавалася через верхній край призми, завдяки чому стовп рідини, що утворився в сифонній ємності, не впливав на її приплив. Висоту стовпа рідини фіксували за допомогою міліметрової шкали 4. Конструктивні розміри сифонної ємності становили: поперечний переріз 50x100 мм, висота 230 мм. У дно сифонної ємності був вмонтований сифон 5, через який відбувалося спорожнення рідини. Вода вловлювалася лійкою 6 і через гнучкий шланг 7 потрапляла в мірний циліндр 8. Конструктивні розміри скляного сифона становили: внутрішній діаметр 13 мм, висота ковпачка 87 мм, довжина низхідної гілки 230 мм. Відстань від дна ємності до верхнього зрізу сифона дорівнювала 10 мм.

Методика проведення експерименту. Контроль рідини, що витікає з сифону, проводився за допомогою мірного циліндра 8 і секундоміра 9 при фіксованому значенні $Q_{ВХ}$, що задається за ротаметром 2. У разі періодичного режиму початок спорожнення відзначали за початком падіння рівня в ємності 3, а закінчення – за припиненням витікання рідини в нижньому зрізі низхідній гілці сифона 5.

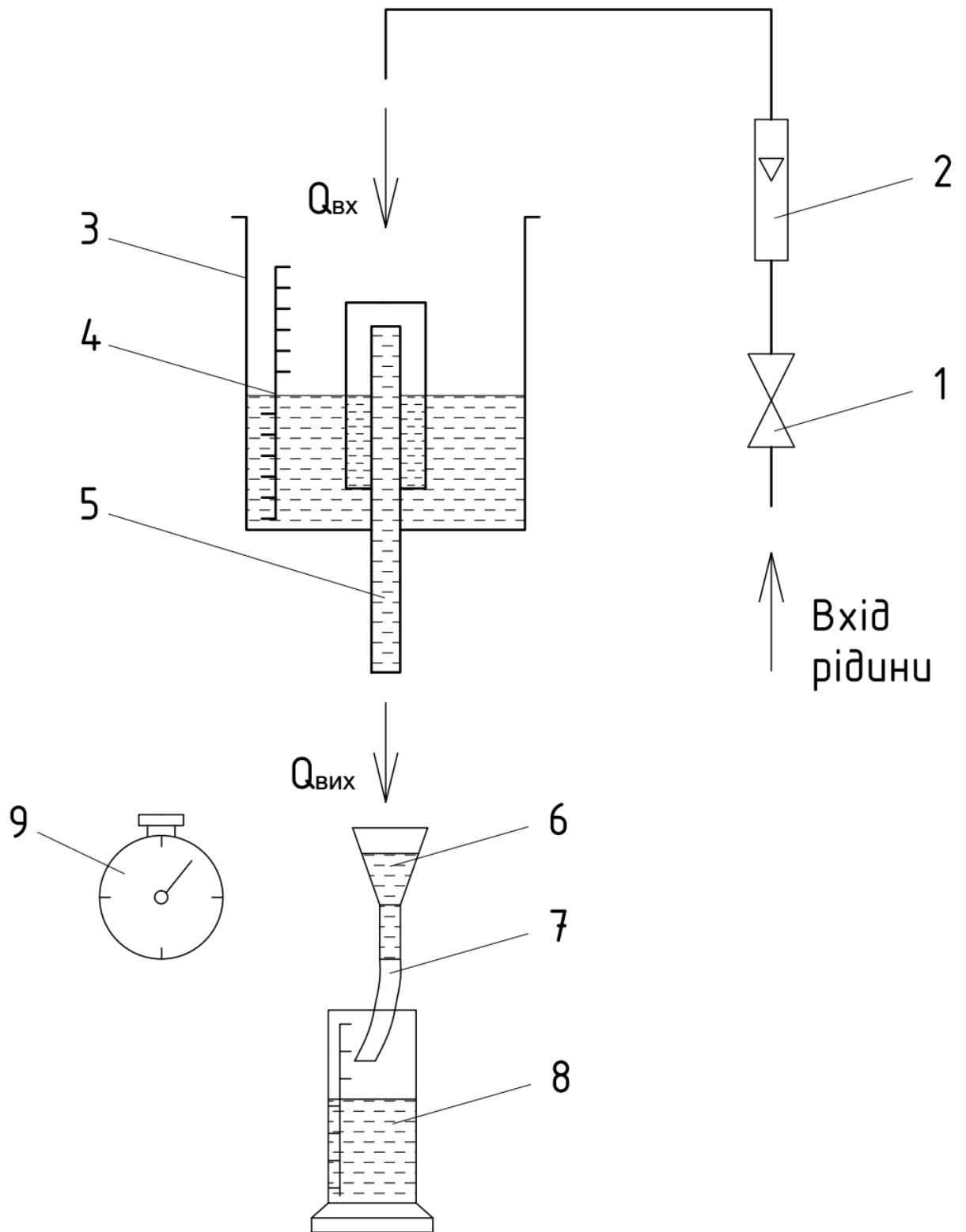


Рисунок 4.1 – Схема експериментальної установки для дослідження гідродинаміки сифонного зрошувача:

- 1 – вентиль, 2 – ротаметр, 3 – сифонна ємність, 4 – міліметрова шкала,
5 – сифон, 6 – воронка, 7 – гнучкий шлаг, 8 – мірний циліндр

За п'ятьма паралельними дослідями результати експериментів перевірялися на значимість за критерієм Q. Аномальні значення виключалися. За даними вибірки, що залишилася, справжнє значення визначалося як середнє арифметичне.

4.2 Прибори, вимірювальна техніка і пристрої

Основними приборами та вимірювальною технікою служили:

- ротаметр;
- секундомір;
- мірна ємність.

Ротаметри з місцевими показаннями типу РМ, що відповідають ГОСТ 13045, призначені для вимірювання об'ємної витрати однорідних потоків чистих і слабозабруднених рідин, що плавно змінюються, повітря і газів (за умови індивідуального градування на даному газі).

Основними елементами ротаметра (рисунок 4.2) є ротаметрична трубка 1 і поплавець 2. Ущільнення по зовнішньому діаметру трубки в верхньому і нижньому кінці досягається за рахунок гумових прокладок 3. Для обмеження ходу поплавця в верхньому і нижньому кінцях трубки передбачені упори 4 або діафрагми 5.

Для захисту обслуговуючого персоналу від попадання агресивного середовища в разі руйнування ротаметричної трубки для ротаметрів передбачено захисний кожух з органічного скла.

Деталі ротаметрів, що стикаються з вимірюваним середовищем, футеровані (покриті) фторопластом.

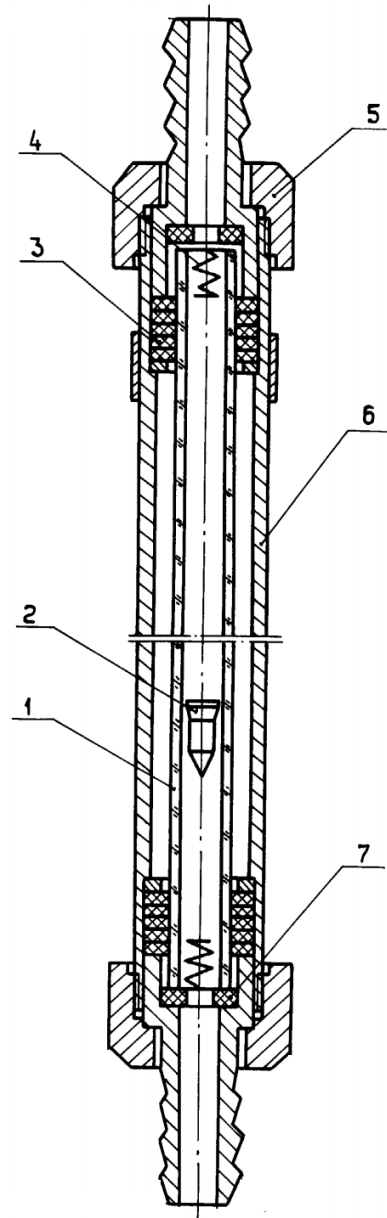


Рисунок 4.2 – Загальний вид ротаметру типу РМ:

1 – трубка ротаметрична; 2 – поплавець; 3 – прокладка; 4 – упор;
5 – гайка накидна; 6 – обойма; 7 – прокладка.

Принцип дії ротаметра заснований на сприйнятті поплавком, що переміщається в ротаметричній трубці, динамічного напору, що проходить знизу вгору потоку рідини або газу.

При підйомі поплавця прохідний зазор між міделем (найбільшим діаметром) поплавця і внутрішнім діаметром трубки збільшується, перепад тиску на поплавці зменшується.

Коли перепад тиску стає рівним вазі поплавка, що припадає на одиницю площі його поперечного перерізу, настає рівновага. При цьому кожному положенню поплавця відповідає певне значення витрати [33].

Секундомір – прилад, здатний вимірювати інтервали часу з точністю до часток секунди. Зазвичай використовуються секундоміри з точністю вимірювання 1/10 і 1/100 секунди.

Мірна ємність – лабораторна судина, на бічній поверхні якої нанесені шкала, горизонтальні мітки якої відповідають певним об'ємам рідини.

4.3 Результати експериментальних досліджень

За результатами експериментальних досліджень одержані дані, які зведені до таблиць 4.1, 4.2 та 4.3.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані з гідродинаміки сифонного зрошувача (доперіодичний режим)

№ з/п	$Q_{ВХ}$, л/хв	h_{0-8} , мм
1	2	3
1	1,17	83
2	2,34	84
3	2,92	86

Таблиця 4.2 – Експериментальні дані з гідродинаміки сифонного зрошувача (періодичний режим)

№ з/п	$Q_{ВХ}$, л/хв	t_3 , с	$t_ч$, с	$t_о$, с	T , с	$V_ч$, л	$V_к$, л	$V_о$, л	h_{0-8} , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3,60	5,3	10,0	4,0	9,3	0,650	0,600	1,250	97
2	4,32	5,0	3,9	4,1	9,1	0,195	0,670	0,865	98
3	4,75	4,5	2,9	4,4	8,9	0,130	0,720	0,85	99

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	5,18	4,0	2,4	4,6	8,6	0,135	0,790	0,925	100
5	562	3,5	2,1	4,9	8,4	0,120	0,835	0,955	101
6	6,05	3,1	1,8	5,3	8,4	0,100	0,980	1,080	102
7	6,48	2,8	1,6	5,9	8,7	0,090	1,100	1,190	103

Таблиця 4.3 – Експериментальні дані з гідродинаміки сифонного зрошувача (постперіодичний режим)

№ з/п	$Q_{ВХ}$, л/хв	h_{0-8} , мм
1	2	3
1	6,91	15
2	7,56	15
3	8,64	25
4	9,72	37
5	10,8	55
6	11,88	105
7	12,96	150

5 ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Експериментальна перевірка вище викладених теоретичних положень проводилась на гідросистемі (рисунок 3.1), в якій робочою рідиною була вода.

На рисунку 5.1 представлені теоретичні криві і відповідні їм дослідні дані залежності горизонту рідини в ємності сифона від кількості рідини, що подається в неї. Зі збільшенням $Q_{ВХ}$ послідовно виникають доперіодичний (А), періодичний (Б) і пост періодичний (В) режими роботи сифону. Точки кількостей подаваної рідини, які сполучаються, або кордону режимів розраховані за рівняннями

$$Q_{ВХ} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_K}} \cdot 3,479 \cdot d_C^{5/2} \quad (48)$$

та

$$Q_{ВХ} = \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot \sqrt{2g \left(h_6 - \frac{h_5 - 2h_4}{3} \right)} \quad (49)$$

і позначені вертикальною пунктирною лінією. Незважно бачити задовільне узгодження теорії і практики.

Експериментально зафіксована оптимальна кількість рідини, що подається в сифонну ємність при періодичному режимі, становить 4,7 л/хв, а розрахунок за рівнянням (47) дає 4,4 л/хв (рисунок 5.2). Відносна похибка не перевищує 7%.

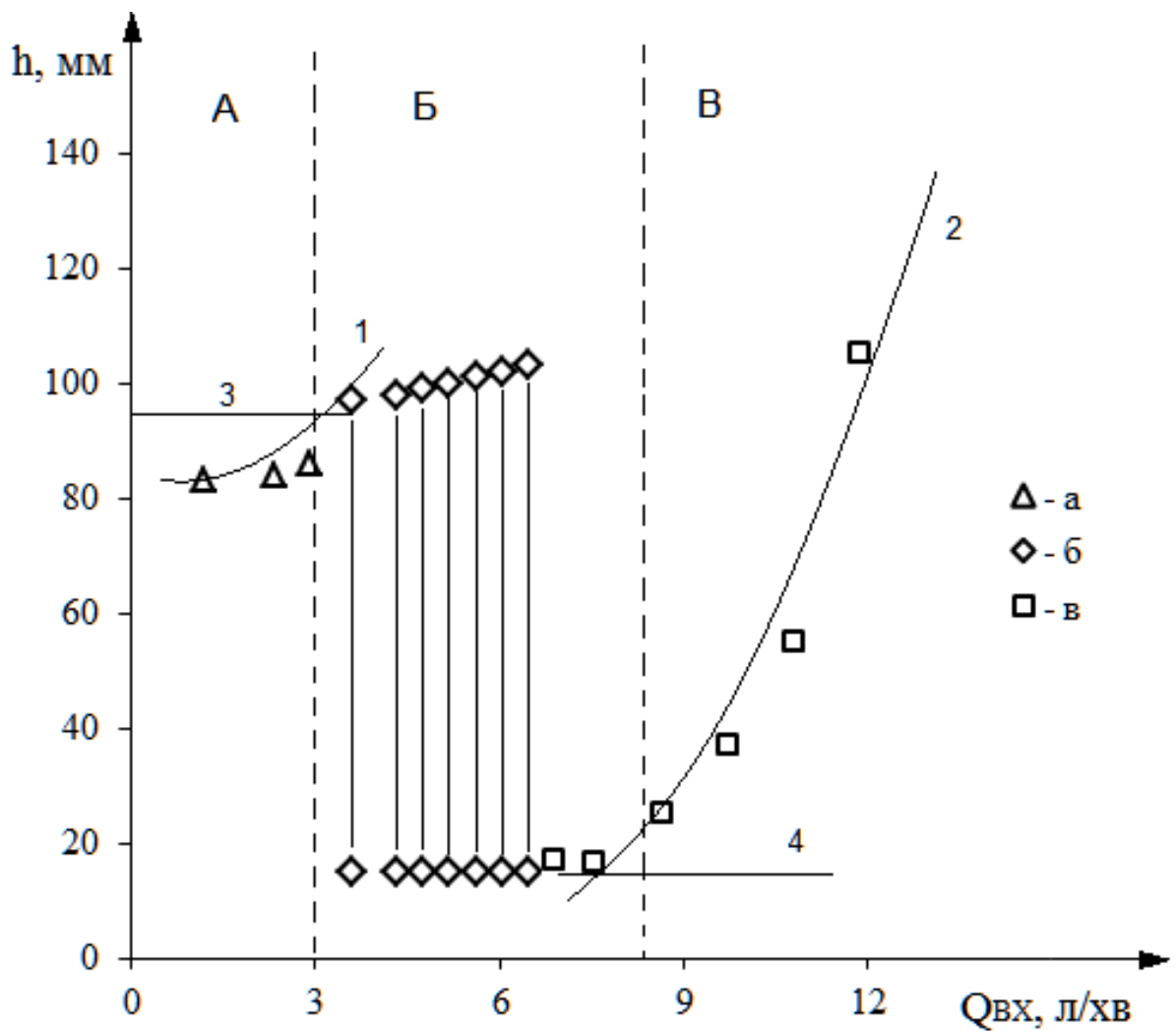


Рисунок 5.1 – Залежних горизонту рідини в ємності сифона від Q_{VX} :
 а, б, в – дослідні точки відповідно доперіодичного, періодичного і постперіодичного режимів; 1, 2 – теоретичні криві, розраховані відповідно за рівняннями (6) і (10); 3, 4 – межі існування відповідно доперіодичного і постперіодичного режимів для ідеальної рідини

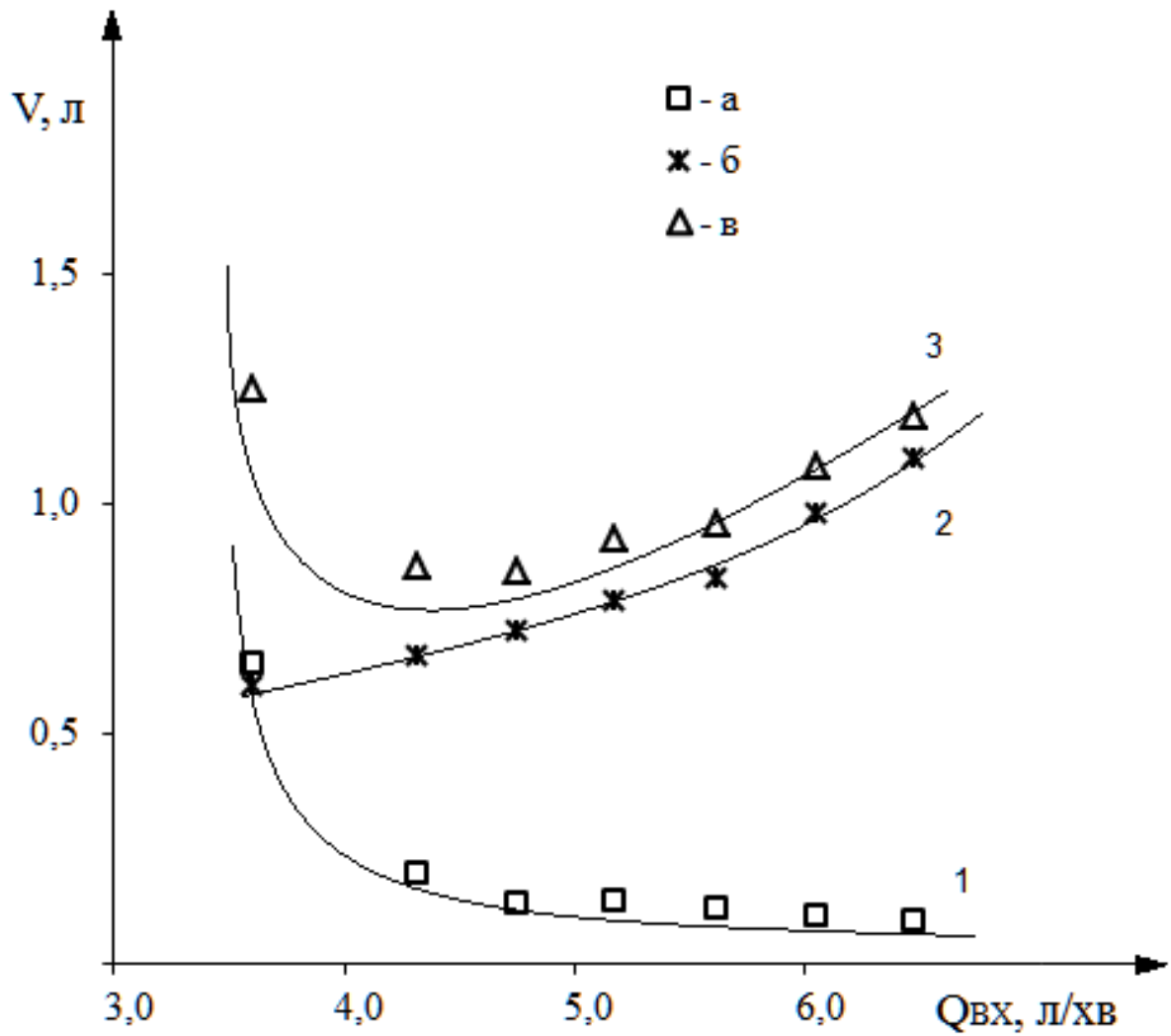


Рисунок 5.2 – Залежність об'єму рідини, який спорожнюється з ємності, при періодичному режимі від $Q_{вх}$:

а – обсяг рідини часткового спорожнення, б – корисний об'єм рідини;

в – доза рідини; 1, 2, 3 – теоретичні криві, розраховані відповідно за рівняннями (39), (45) і (46)

6 МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ ЗРОШУВАЧА СИФОННОГО ТИПУ

Зрошувачі рідини сифонного типу широко використовують в техніці для точної роздачі рідини за певний проміжок часу. Основною перевагою таких пристроїв є простота конструкції і можливість здійснення роботи без підведення зовнішньої енергії, внаслідок перетворення частини власної потенційної енергії в кінетичну. Зазначені переваги сифонних зрошувачів рідини дозволяють їм успішно конкурувати на ринку зрошувачів рідини, оскільки забезпечують високу надійність і економічність.

Незважаючи на різноманіття сифонних зрошувачів рідини [34], всі технічні рішення щодо зміни конструкції спрямовані на забезпечення точності параметрів дозування. Такими параметрами є об'єм дози рідини V_d і період роботи T . Так, наприклад, в [35, 36] технічний результат досягається установкою в верхній точці сифонної трубки рухомого і керованого ззовні клапана або диска. Такі рішення вводять в конструкцію зрошувача додаткові рухомі деталі, значно ускладнюючи пристрій і знижуючи його надійність. Внаслідок цього виключається найважливіша перевага сифонного зрошувача рідини – простота конструкції. Основною причиною таких удосконалень служить відсутність надійного інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини.

Запропоновано [37] новий сифонний зрошувач рідини, представлений на рисунку 6.1, де в ємності 1 вмонтована сифонна трубка, що складається з телескопічних зливної трубки 2 і ковпачка 3. При цьому дно мірної ємності 1 і нижній зріз телескопічного ковпачка 3, а також верхній зріз телескопічної зливної трубки 2 і кришка телескопічного ковпачка 3 жорстко з'єднані між собою. Завдяки телескопічним ковпачку 3 і зливній трубі 2, конструкція має можливість осьового переміщення з фіксацією положення. Така конструкція

сифонного зрошувача рідини дозволяє розширити прогнозований діапазон стійкої роботи і уніфікувати виріб.

Схема роботи сифонного зрошувача рідини показана на рисунку 6.2 і узгоджується з конструкцією пристрою на рисунку 6.1.

Рідину подають по трубопроводу 2, через вентиль 3, яким регулюється її витрата, в мірну ємність 1. Після наповнення рідиною мірної ємності 1 до рівня, що дещо перевищує висоту телескопічної зливної трубки 4, почнеться часткове витікання рідини по стінках телескопічної зливної труби 4 протягом часу $\tau_ч$. При заповненні рідиною поперечного перерізу зливної сифонної трубки 4 відбувається «включення» сифонного зрошувача. Час з моменту збільшення рівня рідини ємності 1 до «включення» вважають часом заповнення $\tau_з$. Далі протягом часу $\tau_к$ впливає корисний об'єм рідини $V_к$. Рівень рідини в ємності 1 зменшується, і по досягненню нею нижнього зрізу телескопічного ковпачка 3 струмінь рідини розривається, в результаті чого витікання рідини зі зрошувача закінчується. Пристрій готовий до нового періоду роботи T .

Параметри роботи сифонного зрошувача, такі як обсяг дози і період роботи, легко можуть бути змінені за попередньо розрахованими даними за допомогою осьового переміщення телескопічних зливної трубки 4 і ковпачка 5.

Дослідження сифона [29] виявило співіснування трьох його режимів роботи, які послідовно виникають зі збільшенням кількості подачі рідини. По відношенню до проміжного періодичному режиму інші режими роботи можуть бути визначені як доперіодичний і постперіодичний.

У роботах [38, 39, 40] теоретично проаналізовані режими роботи сифона і наведено їх математичні описи. Задовільне узгодження теорії і практики дає можливість використання цих математичних описів для розробки інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини.

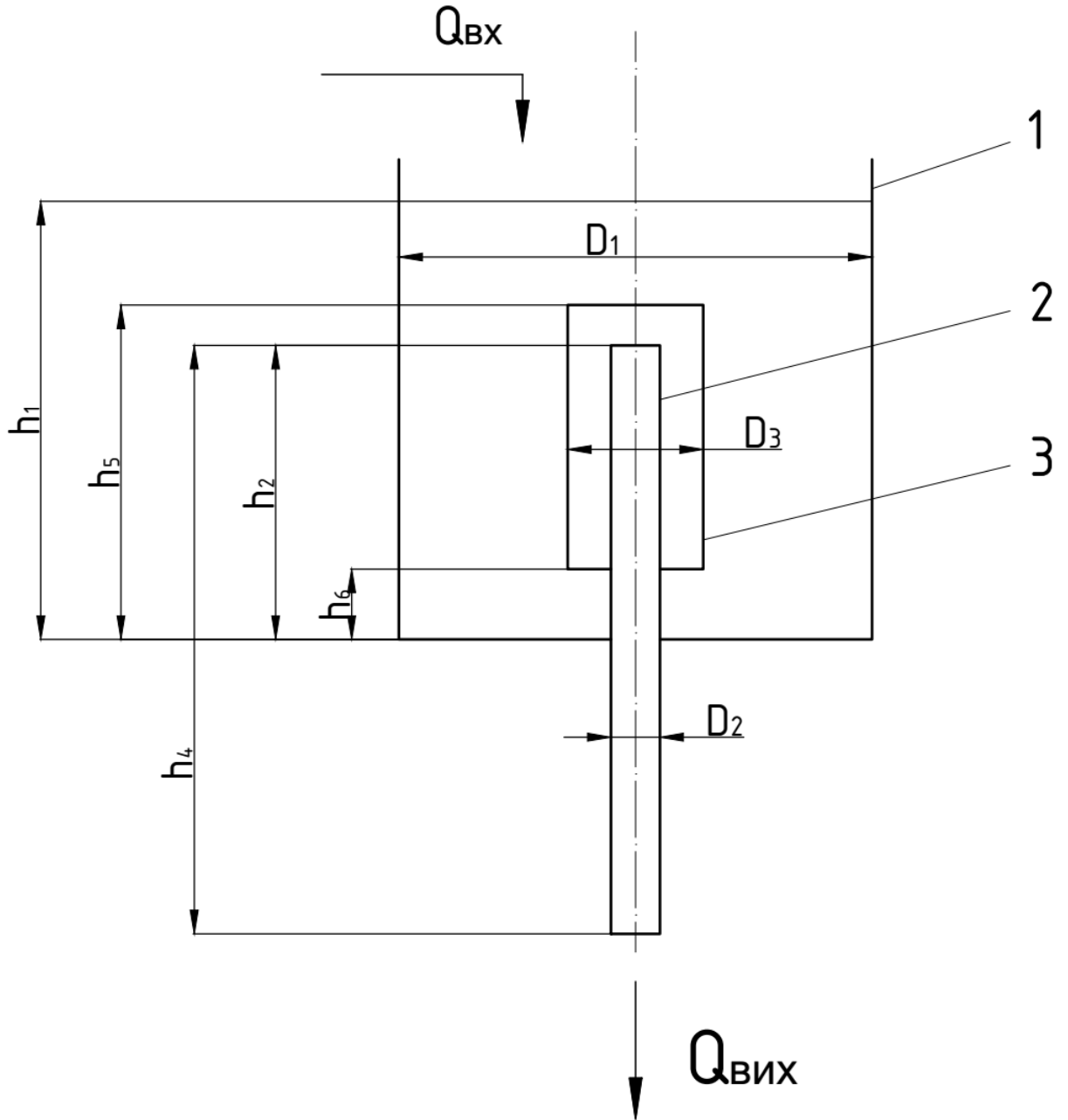


Рисунок 6.1 – Сифонний зрошувач рідини В.М. Москалика [37]:

1 – ємність періодичного режиму, 2 – сифон, 3 – ковпачок

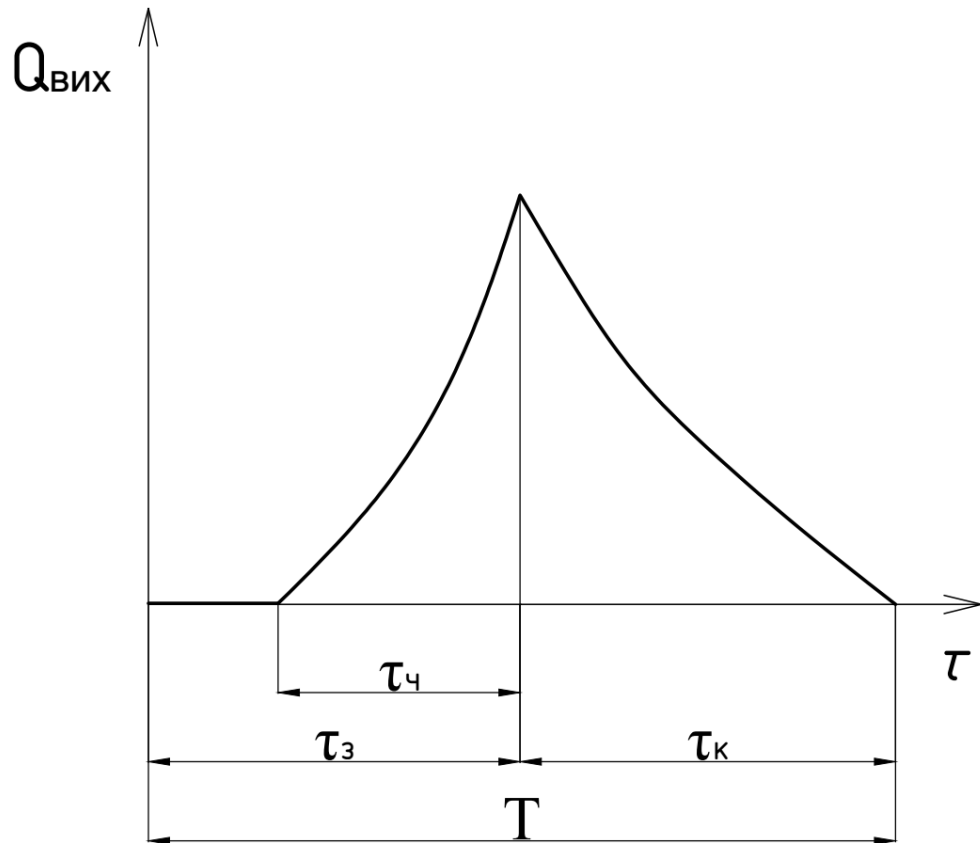


Рисунок 6.2 – Схема витікання рідини $Q_{\text{вих}}$ з сифонного зрошувача протягом часу τ :

$\tau_з$ – час заповнення, с; $\tau_ч$ – час часткового витікання, с; $\tau_к$ – час корисного витікання, с; T – період роботи, с

Для отримання необхідних залежностей скористаємося підходом, викладеним в [39, 40]. На розрахунковій схемі пристрою (рисунок 6.1) нанесені основні геометричні розміри: D_1 , D_2 , D_3 – внутрішній діаметр відповідно ємності, зливної труби і ковпачка; h_1 – рівень рідини в ємності; h_2 , h_4 – висота відповідно зливної труби в ємності і зливної труби під ємністю; h_5 , h_6 – відстань відповідно від дна ємності до верхнього зрізу ковпачка і від дна ємності до нижнього зрізу ковпачка.

Перша точка витрат, що сполучає, доперіодичного і періодичного режимів буде описуватись залежністю (48).

Друга точка витрат, що сполучає, періодичного і постперіодичного режимів буде описуватись наступною залежністю:

$$Q_{\text{BX}} = \sqrt{\frac{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)}{1 + \xi_C}} \cdot f_2 \quad (50)$$

Оптимальна вхідна витрата рідини Q_{BX} , що забезпечує стійкий періодичний режим роботи для даної конструкції сифонного зрошувача рідини, може бути розрахована з рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{f_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{\sqrt{1 + \xi_K}} \cdot f_2 g - \frac{2f_1 Q_{\text{BX}}}{1 + \xi_K} \cdot \ln \left[Q_{\text{BX}} - \frac{1}{1 + \xi_K} f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \right] - \\ & - \frac{f_1 Q_{\text{BX}}^2}{1 + \xi_K} \cdot \frac{1}{Q_{\text{BX}} - \sqrt{\frac{1}{1 + \xi_K}} f_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}} + \frac{2f_1 Q_{\text{BX}}}{1 + \xi_K} \ln Q_{\text{BX}} + \\ & + \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)}}{\sqrt{1 + \xi_K}} \cdot f_2 g + \frac{2f_1 Q_{\text{BX}}}{1 + \xi_C} \times \\ & \times \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{BX}} \right] + \frac{f_1 Q_{\text{BX}}^2}{1 + \xi_C} \times \\ & \times \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_1 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{BX}}} - \frac{f_1 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)}}{\sqrt{1 + \xi_C}} \cdot 3f_2 g - \\ & - \frac{2f_1 Q_{\text{BX}}}{1 + \xi_C} \cdot \ln \left[\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{BX}} \right] + \\ & + \frac{f_1 Q_{\text{BX}}^2}{1 + \xi_C} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{1 + \xi_C}} f_2 \sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)} - Q_{\text{BX}}} = 0 \quad (51) \end{aligned}$$

В якості прикладу представимо інженерний розрахунок сифонного зрошувача води (рисунок 6.1), який повинен видавати рідину об'ємом $V_{\text{Д}} = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$ з періодом роботи $T = 8,9 \text{ с}$.

Метою розрахунку є визначення конструктивних розмірів пристрою та оптимальної об'ємної витрати $Q_{ВХ}$ води, що подається до ємності зрошувача.

Алгоритм розрахунку наступний:

1. З технологічних міркувань приймаємо умову $\tau_3 = \tau_k$.

2. З конструктивних міркувань з урахуванням рекомендацій [41] з вибору оптимальної швидкості витікання рідини приймають внутрішній діаметр зливної трубки $D_2=13 \cdot 10^{-3}$ м, звідки $f_2=1,327 \cdot 10^{-4}$ м².

3. З урахуванням товщини стінки сифонної трубки $\delta_2=1,5 \cdot 10^{-3}$ м розраховують площу поперечного перетину ковпачка:

$$f_3 = \frac{\pi(D_2 + 2\delta_2)^2}{4} + f_2 = 3,337 \text{ м}^2 \quad (52)$$

звідки внутрішній діаметр ковпачка складе $D_3=21 \cdot 10^{-3}$ м з товщиною стінки $\delta_3=1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

4. За рекомендаціями [42] розраховують коефіцієнт гідравлічного опору ковпачка ξ_k . Коефіцієнтом гідравлічного опору тертя внаслідок його малого значення нехтують. Остаточо

$$\xi_k=0,84$$

5. За рівнянням (48) розраховують першу точку витрат, що сполучає, доперіодичного та періодичного режимів роботи сифону

$$Q_{ВХ1}=4,94 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}.$$

6. З умови пункту 1 розраховують об'єм рідини V_k , який витікає за час τ_k . Остаточо отримаємо

$$V_k = 0,5 \cdot V_d = 4,45 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3.$$

7. З конструктивних міркувань приймають конструкцію сифонної ємності у вигляді циліндра внутрішнім діаметром $D_1=80 \cdot 10^{-3}$ м, звідки площа його поперечного перерізу складе $f_1=50,2 \cdot 10^{-4}$ м².

8. Розраховують рівень рідини в сифонній ємності h_1 :

$$h_1 = V_k / f_1 = 88,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

9. З рівнянням з роботи [39] розраховують h_2 :

$$h_2 = h_1 - \left(\frac{1}{1 + \xi_K} \right) \frac{Q_{BX}}{2gf_2^2} \quad (53)$$

10. Далі розраховують h_5 :

$$h_5 = h_2 + D_2 = 85,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

11. За рекомендаціями [42] розраховують коефіцієнт гідравлічного опору сифонної трубки ξ_C . Коефіцієнтом гідравлічного опору тертя через його малу величину нехтують. Остаточно

$$\xi_C = 2,38.$$

12. За рівнянням (50) розраховують другу точку витрат, що сполучає, періодичного і пост періодичного режимів роботи сифону:

$$Q_{BX2} = \frac{\sqrt{2g(3h_6 - h_5 + 2h_4)}}{1 + \xi_C} f_2 = 12,15 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (54)$$

попередньо з конструктивних міркувань прийнявши $h_6 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ і $h_4 = 100 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

13. Оптимальна витрата рідини Q_{BX} , що задовольняє заданим технологічним параметрам і розрахованим конструктивних розмірах сифонного зрошувача рідини, знаходять з рівняння (51) чисельним методом Ньютона (методом розподілу відрізка навпіл) [43, 44]. Суть методу полягає в побудові ітераційної послідовності

$$Q_{BX(n-1)} = Q_{BX(n)} - \frac{f(Q_{BX(n)})}{f'(Q_{BX(n)})} \quad (55)$$

що зводиться до кореня рівняння $f(Q_{BX})=0$ в діапазоні $[Q_{BX1}, Q_{BX2}]$, де n – число ітерацій. Ітераційний процес припиняють при виконанні умови

$$|Q_{BX(n)} - Q_{BX(n-1)}| < \varepsilon$$

де ε – точність знаходження Q_{BX} .

Оптимальна об'ємний витрата води, яка подається в ємність, складає $Q_{BX} = 7,92 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$.

Перевіркою вищенаведеного алгоритму розрахунку сифонного зрошувача рідини може служити обчислення об'єму дози V_d , яка розраховується за рівнянням (39) і (45) роботи [39].

Висновок за розділом

Сифонний зрошувач рідини [37] був виготовлений з органічного скла і металу за розрахованими авторами конструктивними розмірами: $D_1=80 \cdot 10^{-3}$ м, $D_2=13 \cdot 10^{-3}$ м, $D_3=21 \cdot 10^{-3}$ м, $h_2=76 \cdot 10^{-3}$ м, $h_4=100 \cdot 10^{-3}$ м, $h_5=86 \cdot 10^{-3}$ м, $h_6=10 \cdot 10^{-3}$ м. Випробування проводили при розрахованій оптимальній витраті води $Q_{ВХ} = 7,92 \cdot 10^{-5}$ м³/с. Встановлено, що конструктивні розміри сифонного зрошувача узгоджуються з його заданими технологічними параметрами: $V_d = 8,9 \cdot 10^{-4}$ м³ і $T = 8,9$ с.

Для більш складної або безперервної організації дозування рідини рекомендується зрошувач рідини [45]. Розрахунок такого пристрою ведуть аналогічно вищенаведеному алгоритму з урахуванням особливості конструкції.

ВИСНОВКИ

За результатами виконання дипломної роботи вирішена задача вдосконалення сифонного зрошувача рідини з можливістю розширення прогнозованого діапазону сталої роботи

На підставі проведення експериментальних досліджень сформульовані наступні висновки:

1. проведено аналітичний огляд з теорії гідродинаміки; надано характеристику основних типів зрошувальних пристроїв, розглянуто вплив способу зрошення на роботу апарату;

2. для розширення прогнозованого діапазону сталої роботи запропоновано конструкцію сифону за патентом України №60720, що містить мірну ємність, трубопровід для підведення рідини з регулюючим вентилям, зливну трубу, закріплену в днищі ємності та ковпак, причому зливна труба і ковпак мають телескопічну конструкцію;

3. сифонний зрошувач рідини запропонованої конструкції має розширений прогнозований діапазон сталої роботи, що дозволяє знизити витрати праці і матеріалів при його уніфікації;

4. експерименти проводилися на експериментальній установці, у якості сифону використовувалась прямокутна скляна призма 50x100 мм, висотою 230 мм; підтверджені теоретичні дані з гідродинаміки сифонного зрошувача у доперіодичному, періодичному та постперіодичному режимах, що одержані раніше;

5. наведено алгоритм та приклад інженерного розрахунку сифонного зрошувача рідини за допомогою одержаних раніше математичних описів. За результатами експериментальних досліджень роботи сифонного зрошувача рідини, виготовленого за розрахованими геометричними габаритними величинами, визначена задовільна узгодженість конструктивних розмірів сифонного зрошувача його заданим технологічним параметрам.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Чижиумов С. Д. Основы гидродинамики: учеб. пособие / С. Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре: ГУВПО «КНАГТУ», 2007. – 106 с.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ГХИ, 1961. – 831 с.
3. Гусев В. П. Основы гидравлики: учеб. пособие / В. П. Гусев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 172 с.
4. Лейбензон Л. С. Гидравлика / Л. С. Лейбензон, Д. С. Вильнер, П. И. Шумилов, В. С. Яблонский. – Нефтеиздат, 1932. – 315 с.
5. Агроскин И. И. Гидравлика / И. И. Агроскин, Г. Т. Дмитриев, А. И. Иванов, Ф. И. Пикалов. – Госэнергоиздат, 1944. – 285 с.
6. Тарг С. М. Основные задачи ламинарных течений / С. М. Тарг. – Гостехиздат, 1946. – 221 с.
7. Латышенков А. М. Гидравлика / А. М. Латышенков, В. Г. Лобачев. – М.: Стройиздат, 1945. – 312 с.
8. Френкель Н. З. Гидравлика / Н. З. Френкель. – Л.: Госэнергоиздат, 1947. – 195 с.
9. Коган В. Б. Теоретические основы типовых процессов и аппаратов химической технологии / В. Б. Коган. – Л.: Химия, 1977. – 592 с.
10. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. В 2-х книгах / Н. И. Гельперин. – М.: Химия, 1981. – 812 с.
11. Головачевский Ю. А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности / Ю. А. Головачевский. – М.: «Машиностроение», 1974. – 271 с.
12. Есьман И. Г. Гидравлика и гидравлические машины / И. Г. Есьман, И. Б. Есьман, В. И. Есьман. – Баку: Азнефтизат, 1955. – 480 с.

13. Жаворонков Н. М. Гидравлические основы скрубберного процесса и теплопередачи в скрубберах / Н. М. Жаворонков. – М.: «Советская наука», 194. – 244 с.
14. Кузьминых И. Н. Технология серной кислоты / И. Н. Кузьминых. – М.: Госхимиздат, 1955. – 228 с.
15. Малин К. М. Технология серной кислоты / К. М. Малин, Н. Л. Аркин, Г. К. Боресков, М. Г. Слинько. – М.-Л.: Госхимиздат, 1950. – 570 с.
16. Малюсов В. А. Основные проблемы в области процессов разделения смесей / В. А. Малюсов. – «Теоретические основы химической технологии». – 1972. – Т.6, №6. – С. 817-831.
17. Рамм В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – М.: «Химия», 1966. – 767 с.
18. Хоблер Т. Массопередача и адсорбция / Т. Хоблер. – Л.: Химия, 1964. – 479 с.
19. Стабников В. Н. Расчет и конструирование контактных устройств ректификационных и абсорбционных аппаратов / В. Н. Стабников. – Киев: Техника, 1970. – 207 с.
20. Семенова Т. А. Очитка технологических газов / Т. А. Семенова, И. А. Лейтес, Ю. В. Аксельрод, Е. Н. Харьковская, М. И. Мариана, С. П. Сергеев. – М.: Химия, 1969. – 392 с.
21. Duecker W. W. The manufacture of sulfuric acid / W. W. Duecker, J. R. West. – New York: Renhold publ. corp. London, Chapman a Hill, 1959. – 515 p.
22. Каретников Ю. П. Определение условий для равномерного орошения башен с насадками / Ю. П. Каретников, К. П. Жиделева. – «Химическая наука и промышленность». – 1957. – №6, т. II. – С.795-796.
23. Большаков А. Г. Исследование смачиваемости крупных колец Рашига при их упорядоченной укладке в насадочных колоннах /

А. Г. Большаков, А. Т. Гриневич. – «Химическое машиностроение». – 1962. – №3. – С.14-16.

24. Головачевский Ю. А. Растекание жидкости в верхних слоях колонных аппаратов / Ю. А. Головачевский. – «Химическая промышленность». – 1970. – №7. – С. 536-540.

25. Гильденблат И. А. Влияние распределения орошения в насадочных абсорберах на эффективность массопередачи в жидкой фазе / И. А. Гильденблат, Н. М. Гурова, В. М. Рамм. – «Химическая промышленность». – 1968. – №3. – С.59-63.

26. Пат. України № 82068, МПК C01F13/00, G01F11/00, E03D1/00; Заяв. 20.12.2004; Опубл. 11.03.2008. Бюл. № 5. – 4 с.

27. Пат. України № 60720, МПК G01F 13/00; Заявл. 13.12.2010; Опубл. 25.06.2011. Бюл. № 12. – 5 с.

28. Бондаренко А. А. Визначення меж існування періодичного режиму сифонного дозатору рідини / А. А. Бондаренко, В. М. Москалик Матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 02.12.2016 р. «Майбутній науковець–2016». Ч. II – Северодонецьк: СНУ ім. В. Даля. – 2016. – С.72-73.

29. Куприн А. И. Исследование параметров сифона периодического действия / А. И. Куприн, В. К. Литвиненко. – Гидравлика и гидротехника: Республ. межведом, науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 1975. – № 21. – С. 83-86

30. Задорский В. М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии / В. М. Задорский. – К.: Техніка, 1979. – 199 с.

31. Куприн А. И. К определению режима работы сифона / А. И. Куприн, В. Н. Гоцуленко. – Инж.-физ. журн. – 1986. – Т.52. – № 6. – С. 916-920.

32. Захаров В. М. Исследование работы одиночного элемента распределительного устройства сифонного типа / В. М. Захаров, С. А. Круглов, Н. С. Гинсбург. – Труды V Всесоюзной конф. по ректификации. – Северодонецк: ГосНИИметанолпроект. – 1984. – С.134-135.

33. Ротамер с местными показаниями типа РМ. Руководство по эксплуатации ЛГФИ. 407142.001 РЭ.
34. Куприн А. И. К определению режима работы сифона / А. И. Куприн, В. Н. Гоцуленко. – Инж.-физ. журн. – 1979. – Т. 52. – №6. – С. 916-920.
35. Пат. 15323 А Україна, МПК-2006.01 G01F 13/00. Сифонний дозатор // О. І. Куприн, Н. Ф. Цяпко, Л. М. Мамаєв. – № 94128194; Заявл. 26.12.1994; Опубл. 30.06.1997. Бюл. № 3. – 3 с.
36. Пат. 13438 А Україна, МПК-2006.01 G01F 13/00. Двокамерний сифонний дозатор // О. І. Куприн, Н. Ф. Цяпко, Л. М. Мамаєв. – № 94128193; Заявл. 26.12.1994; Опубл. 16.12.1996. Бюл. №0. – 6 с.
37. Пат. 60720 U Україна, МПК-2011.01 G01F 13/00. Сифонний дозатор рідини В. М. Москалик // В. М. Москалик. – № U201014892; Заявл. 13.12.2010; Опубл. 25.06.2011. Бюл. № 12. – 5 с.
38. Москалик В. М. Визначення меж існування періодичного режиму сифонного дозатора рідини / В. М. Москалик, А. А. Бондаренко. – Майбутній науковець–2016: матеріали всеукр. наук.-практ. конф. 2 грудня 2016 р., м. Северодонецьк. Ч. II. – Северодонецьк: Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля, 2016. – С. 72-73.
39. Москалик В. М. Истечение жидкости из сифона / В. М. Москалик. – Хімічна промисловість України. – 2008. – № 1. – С. 50-55.
40. Москалик В. М. Истечение жидкости из сифона / В. М. Москалик. – Вопросы химии и химической технологии. – 2007. – № 6. – С. 214-219
41. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов. 10-е изд. перераб. и доп. / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков / Под ред. чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.

42. Идельчик И. Е Справочник, по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. У. О. Штейнберга. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

43. Демидович Б. П. Основы вычислительной математики. 3-е изд. исправленное / Б. П. Демидович, И. А. Марон. – М.: Наука, 1966. – 664 с.

44. Плис А. И. Лабораторный практикум по высшей математике: учеб, пособие для вузов / А. И. Плис, Н. А. Сливина, – М.: Высш. школа, 1983. – 208 с.

45. Пат. 81421 U Україна, МПК-2006.01 B01D 3/16, B01D 3/26, B01D 53/18. Розподільник рідини // В. М. Москалик. – № u201301369; Заявл. 05.02.2013; Опубл. 25,06.2013. Бюл, №12. – 5 с.