

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Шаманський Сергій Йосипович

УДК 628.336.5

**НАУКОВО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ
УДОСКОНАЛЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИХ
ПРОЦЕСІВ ВОДОВІДВЕДЕННЯ**

Спеціальність 21. 06. 01 – екологічна безпека

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

КИЇВ 2019

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.

Роботу виконано у Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант

доктор технічних наук, професор
Бойченко Сергій Валерійович
Національний авіаційний університет,
декан Факультету екологічної безпеки,
інженерії та технологій, м. Київ

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Адаменко Ярослав Олегович
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
завідувач кафедри екології,
м. Івано-Франківськ.

доктор технічних наук, професор
Петрук Василь Григорович
Вінницький національний технічний університет
Заслужений природоохоронець України,
директор інституту екологічної безпеки
та моніторингу довкілля, м. Вінниця.

доктор технічних наук, професор
Дичко Аліна Олегівна
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри інженерної екології, м. Київ.

Захист відбудеться « 06 » червня 2019 року об «11⁰⁰» годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.09 Національного авіаційного університету за адресою: проспект Космонавта Комарова, 1, корпус 12, ауд. 211, м. Київ, Україна, 03058.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: проспект Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058 і на сайті: www.nau.edu.ua

Автореферат розісланий « 04 » травня 2019 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.09, к.т.н., доцент



Л.М. Черняк

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Базові принципи збалансованого розвитку, поетапне впровадження яких відбувається в Україні, диктують необхідність того, щоб забезпечення потреб людства у ресурсах не суперечило пріоритетам охорони довкілля та здоров'я людей, не порушувало інтересів прийдешніх поколінь.

В Україні за 2016 рік у поверхневій водні об'єкти скинуто близько $7,7 \cdot 10^9$ м³ стічних вод. З них забруднених – близько $1,6 \cdot 10^9$ м³ (21 %), підприємствами промисловості – близько $4,5 \cdot 10^9$ м³. У процесі очищення тільки на комунальних (міських та селищних) каналізаційних очисних спорудах України за цей рік утворилось $45 \cdot 10^6$ м³ біологічно та бактеріологічно забрудненого осаду (зі значним умістом патогенних мікроорганізмів, таких як яйця гельмінтів, аскарид тощо), що також потребує утилізації.

Через незадовільний сучасний стан очисних споруд та низьку ефективність технологічних процесів очищення та утилізації в Україні стічні води є одним з головних факторів забруднення гідросфери, а осади – одним із суттєвих факторів забруднення літосфери, що, у свою чергу, створює низку екологічних ризиків для довкілля. В умовах постійного погіршення стану довкілля, підвищення якості очищення стічних вод перед скиданням та поліпшення органолептичних та інших характеристик осадів, що утворюються, перед їх утилізацією є сьогодні невідкладним завданням. Крім того, в умовах зростання вартості земель актуальним завданням є також скорочення площ, що займають очисні споруди та підвищення їх еко-логічної безпеки з метою зменшення розмірів санітарно-захисних зон навколо них.

Однією з головних вимог, що ставляться до проектування очисних споруд є синтез їх оптимальних параметрів і структури, що забезпечували б високий ступінь очищення стічних вод, досягнення максимальної незалежності якості води після очищення від концентрації забруднень у стоках, що подаються на очищення, досягнення максимальної компактності споруд та естетичного зовнішнього вигляду, максимальне отримання і використання ресурсів, що є побічними продуктами процесів очищення (теплова енергія, біогаз, безпечні органічні добрива тощо). Очисні споруди є потенційним джерелом отримання додаткових сировинних ресурсів, що розглядаються сьогодні як відходи, а також нетрадиційних енергоносіїв, потенціал яких повною мірою не використовується, перш за все, через недоліки сучасних технологій очищення стічних вод. Загалом можна стверджувати, що системи водовідведення працюють як техноекосистеми першого виду (відкриті системи, що на вході споживають ресурси і енергію, а на виході створюють продукт і відходи, що не піддаються рециклінгу).

Отже, постає **науково-прикладна проблема** створення оновленої концепції водовідведення, розроблення нових конструктивних рішень, створення нових і удосконалення наявних екологічно безпечних технологічних процесів очищення та утилізації промислових і комунальних стічних вод, що забезпечить раціональне використання наявних відновлюваних ресурсів, синтез оптимальних параметрів та структури систем водовідведення для зменшення їх шкідливих впливів на довкілля

та забезпечить їх роботу як техноекосистем другого виду (частково замкнених, у яких частина відходів використовується як сировина для виробництва продукції).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження проводились відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки: Енергетика та енергоефективність, Раціональне природокористування, визначених Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» від 11 липня 2001 року №2623-III; відповідно до пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок «Енергоефективні технології на транспорті», «Технології раціонального природокористування, підвищення ефективності очищення стічних вод та запобігання забрудненню водних об'єктів», «Технології розроблення та використання нових видів палива, відновлюваних і альтернативних джерел енергії та видів палива. Технології використання скидних енергоресурсів. Теплонасосні технології», затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 7 вересня 2011 року № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року»; у рамках науково-дослідних тем кафедри екології Національного авіаційного університету: «Вдосконалення технології очищення господарсько-побутових стічних вод та обробки осадів господарсько-побутових стічних вод авіапідприємства» (державний реєстраційний номер 0116U008720), «Екотоксикологічна оцінка водних об'єктів мегаполісу на прикладі м. Києва» (державний реєстраційний номер 0118U004286).

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є зниження рівня екологічної небезпеки процесів водовідведення розробленням науково-технологічних засад створення оновленої концепції водовідведення, а також нових конструктивних рішень та удосконаленням технологічних процесів очищення комунальних стічних вод і утилізації осадів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан екологічно безпечних процесів водовідведення, їх технічних та екологічних характеристик.
2. Створити оновлену екологічно безпечну, енерго- та економічно- ефективну концепцію водовідведення.
3. Розробити для застосування рекомендації щодо зниження рівня екологічної небезпеки та підвищення рівня економічної ефективності процесів доочищення господарсько-побутових стічних вод від біогенних елементів.
4. Розробити для застосування рекомендації щодо зниження рівня екологічної небезпеки та підвищення рівня економічної ефективності процесів анаеробної стабілізації осадів стічних вод.
5. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення точності процесів вимірювання витрати та кількості стічних вод на очисних спорудах.
6. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення енергоефективності процесів перекачування стічних вод і перекачування рециркуляційного активного мулу без зниження його експлуатаційних властивостей.
7. На основі розроблених рекомендацій запропонувати нові конструктивні рішення щодо удосконалення технологічних процесів очищення та утилізації господарсько-побутових стічних вод та їх осадів.

Об'єкт дослідження – екологічно безпечні процеси водовідведення, очищення господарсько-побутових стічних вод і утилізації їх осадів.

Предмет дослідження – способи, технології та обладнання водовідведення та їх вплив на екологічну безпеку та економічну ефективність процесів очищення господарсько-побутових стічних вод і стабілізації їх осадів.

Методи дослідження ґрунтуються на системному аналізі теоретичних досліджень, фізичному та математичному моделюванні й методах прогнозування. Використано методи диференційно-інтегрального числення, чисельні методи, методи регресійного аналізу. Експериментальні дослідження виконувались з використанням сенсорів рН з аналоговими підсилювачами, сенсорів нітратів NITRATAZ sc, інтегральних мікросхем K140УД13 за ТУ 11-БКО.348.095-07ТУ85. Також використовувались стандартні методики контролю якості води.

Наукова новизна отриманих результатів. Дисертація розв'язує актуальну науково-прикладну проблему подальшого розвитку методології параметричної та структурної оптимізації господарсько-побутових каналізаційних очисних споруд у сфері розроблення теоретичних засад удосконалення екологічно безпечної та енерго- та економічно-ефективної концепції водовідведення. Наукову новизну визначають такі теоретичні та експериментальні результати:

уперше:

- систематизовано та науково обґрунтовано концепцію підвищення рівня екологічної безпеки та економічної ефективності процесів водовідведення, що створює та забезпечує необхідні та достатні умови інноваційного удосконалення господарсько-побутових каналізаційних очисних споруд як техноекосистеми першого виду з переходом до техноекосистеми другого виду;

- розвинуто науково-технологічні засади організації функціонування техноекосистем другого виду через удосконалення маловідходних і безвідходних технологічних процесів у водовідведенні;

- теоретично та експериментально підтверджено ефективність процесу очищення стічних вод від біогенних елементів з одночасним культивуванням енергетичних мікроводоростей, що сприяє інтенсифікації якісного очищення стічних вод, отриманню сировини для виробництва біопалив третього покоління та синергетично підвищує еколого-енергетичний ефект процесів водовідведення;

- науково обґрунтовано та створено методологічні засади ефективного використання нових методів змінного перепаду тиску для вимірювання витрат і кількостей стічних вод на очисних спорудах, що дозволяє підвищувати рівень їх екологічної безпеки;

- узагальнено сучасні дослідження енергетичної ефективності способів перекачування стічних вод і зворотного активного мулу зі збереженням його експлуатаційних якостей, що дозволяє підвищувати як рівень екологічної, так і енергетичної безпеки очисних споруд;

удосконалено:

- концепцію екологічно безпечного, енерго- та економічно-ефективного водовідведення;

- наукові дані щодо математичної інтерпретації та розроблено алгоритм розрахунку параметрів перекачувального обладнання для очисних споруд, що

забезпечує превентивне запобігання зростанню кількості шкідливих речовин у стічних водах;

набуло подальшого розвитку:

- теоретичні засади обґрунтування параметрів енергоефективних і екологічно безпечних чотири стадійних технологічних процесів анаеробного зброджування осадів стічних вод з отриманням біогазу, що дозволило виконувати технологічні розрахунки реальних процесів з отриманням більшої кількості метану та товарного вуглекислого газу.

Практичне значення отриманих результатів. Практична цінність результатів досліджень полягає в такому:

1. Розроблено нову технологічну схему водовідведення, що на відміну від існуючих аналогів функціонує як техноекосистема другого виду та дозволяє зменшити скиди біогенних елементів у водні об'єкти, зменшити викиди вуглекислого газу в атмосферу, а також отримувати альтернативні енергоносії.

2. Розроблено конструктивні рішення установок для очищення стічних вод від біогенних елементів, що порівняно з існуючими аналогами дозволяє здійснювати одночасне культивування енергетичних мікроводоростей. Конструктивні рішення дозволяють проводити технологічний процес у тому числі у холодну пору року.

3. Розроблено технологічну схему чотиристадійного анаеробного зброджування осадів стічних вод, що порівняно з існуючими аналогами дозволяє скоротити терміни бродіння та зменшити об'єми метантенків, а також розроблено конструктивні рішення метантенків, що дають змогу реалізувати чотиристадійну технологічну схему.

4. Розроблено конструктивні рішення лічильника кількості та витрати змінного перепаду тиску з низькою похибкою вимірювання та високою стійкістю до збурень, що на відміну від існуючих аналогів дозволяє виконувати більш точні вимірювання для керування потоками стічних вод на очисних спорудах.

5. Розроблено конструктивні рішення шнекового насоса, що має вищий порівняно з існуючими аналогами коефіцієнт корисної дії для перекачування стічних вод та рециркуляційного активного мулу. На відміну від відцентрових насосів він працює без динамічних навантажень і не погіршує експлуатаційних характеристик активного мулу.

6. Отримані результати роботи були використані Міністерством регіонального розвитку та будівництва України під час розроблення державних стандартів і державних будівельних норм.

Корисність і новизна роботи підтверджена 7 патентами, актами упровадження на підприємствах України та 6 нормативними документами.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові положення, що містяться в дисертації, отримані автором самостійно. Теоретичне та експериментальне дослідження виконано особисто, а впровадження розробок у практику – за безпосередньої участі автора. Наукові праці [9,10,17,38,54] виконано самостійно. У публікаціях у співавторстві здобувачу належать: [1] – обґрунтування та розроблення технологічних схем екологічно безпечних процесів водовідведення, моделювання режимів роботи обладнання; [2] – конструювання закритого фотобіореактора для культивування мікроводоростей; [3] – обґрунтування екологічно безпечної кон-

цепції водовідведення аеропорту; [4] – розроблення принципової схеми тандемного прокладання магістральних трубопроводів і розрахунок економічного ефекту; [5] – розроблення математичної моделі роботи шнекового насоса та методика розрахунку складових коефіцієнта корисної дії; [6] – розроблення принципової схеми та моделювання конструктивних параметрів шнекового насоса з високим об'ємним коефіцієнтом корисної дії; [7] – моделювання оптимального співвідношення конструктивних параметрів шнекового насоса для отримання максимального коефіцієнта корисної дії; [8] – моделювання коефіцієнта корисної дії шнекового насоса на різних режимах роботи; [11] – розроблення технологічної схеми лічильника стічних вод змінного перепаду тиску зі стандартним соплом і моделювання похибки вимірювання; [12] – обґрунтування технології анаеробної стабілізації осадів стічних вод за чотиристадійною схемою; [13] – порівняльний аналіз переваг і недоліків методів інтенсифікації гідролізу органічних сполук і техніко-економічний розрахунок їх реалізації; [14] – розроблення методики та розрахунок потенційної продуктивності вирощування мікроводоростей у погодних умовах Київської області; [15] – обґрунтування можливостей використання закритих біореакторів для видалення залишків фармацевтичної продукції зі стічних вод; [16] – аналізування діючої нормативної документації щодо обмежень скидання біогенних елементів зі стічними водами у водойми і формування рекомендацій щодо вдосконалення принципів нормування; [18] – адаптація методики та розрахунок потенційної продуктивності вирощування мікроводоростей у відкритих і закритих фотобіореакторах у погодних умовах регіонів України; [19] – розроблення технологічної схеми енерго-ефективної анаеробної стабілізації осадів стічних вод; [20] – обґрунтування та розроблення концепції водовідведення авіапідприємства; [21] – аналізування процесу гідролізу органічних речовин та формування вимог до технологічних схем гідролізу; [22] – розроблення технологічних засад екологічно безпечних процесів водовідведення; [23] – розроблення принципової схеми лічильника змінного перепаду тиску та моделювання похибки вимірювання; [24] – аналізування перспектив використання закритих біореакторів для очищення стічних вод від біогенних елементів; [25–31] – конструювання та конструктивні схеми; [32–37] – правила розроблення інженерних розділів у проектуванні; [39–53] – систематизація результатів попередніх досліджень.

Обговорення, аналіз та узагальнення результатів, розроблення нової концепції водовідведення проведено спільно з науковим консультантом.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних досліджень доповідались та обговорювались на: Всеукраїнських науково-практичних конференціях «I, V та VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю» (Вінниця, 2006, 2015, 2017); IX Міжнародній конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС 2008)» (Вінниця, 2008); Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства» (Львів, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції «Green Energy» (Київ, 2012); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Екологічна безпека держави» (Київ, 2013); VII VIII та IX Міжнародних науково-технічних конференціях «Поступ в нафтопереробній та нафтохімічній промисловості» (Львів, 2014, 2016, 2018); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Нетрадиційні

і поновлювані джерела енергії як альтернатива первинним джерелам енергії в регіоні» (Львів, 2015); XI Міжнародній науково-технічній конференції «Авіа-2015» (Київ, 2015); II і III Міжнародних науково-практичних конференціях «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (Львів, 2015, 2018); II Міжнародній науково-практичній конференції «Новітні досягнення біотехнології та нанофармакології» (Київ, 2015); International Symposium on Sustainable Aviation (Istanbul, Turkey, 2016); XVI Всеукраїнській науково-практичній конференції «Актуальні проблеми енергетики та екології» (Одеса, 2016); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (Харків, 2016); XXVIII і XXIX Міжнародних конференціях «Systemy i Środki Transportu Samochodnego» (Rzeszów, Poland, 2016, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції «Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації» (Івано-Франківськ, 2017); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології і обладнання для їх обслуговування (СЕУТТОО-2017)» (Херсон, 2017); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (Кременчук, 2017); International research and practice conference «Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences» (Radom, Poland, 2017); 16-й Міжнародній науково-технічній конференції (71-й Науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників, докторантів і аспірантів Білоруського національного технічного університету) (Мінськ, Білорусь, 2018).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 54 наукові праці. З них одну монографію, 2 розділи у закордонних колективних монографіях, 21 наукова стаття, з них 6 наукових статей, що індексуються у міжнародних науково-метричних базах і 15 наукових статей у виданнях, що індексуються науково-метричними базами даних, що входять до переліку ДАК України, з них 3 одноосібні, 7 патентів України, 6 нормативних документів, 17 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій різного рівня.

Структура та обсяг роботи: Дисертація складається зі вступу, семи розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації 401 сторінка з них 368 сторінок основного тексту. Дисертація містить 65 рисунків, 53 таблиці, 236 найменувань використаних джерел та 7 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть та стан проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, сформульовано мету, основні завдання дослідження, наукову новизну отриманих результатів. Розглянуто практичне значення та впровадження результатів дисертації. Наведено відомості про публікації та апробацію роботи.

У першому розділі досліджено основні сучасні принципи організації процесів водовідведення їх технічні та екологічні характеристики, їх вплив на довкілля, зокрема на поверхневі води, більшість з яких в Україні відносять до забруднених, чи дуже забруднених. Це суттєво підвищує екологічні ризики. Саме вживання води

ненормативної якості є причиною розповсюдження багатьох інфекційних та онкологічних хвороб. Установлено, що широко використовувані в Україні технології біологічного очищення не забезпечують видалення біогенних елементів. Щорічно разом зі стічними водами у поверхневі водні об'єкти надходить: завислих речовин – $45 \cdot 10^6$ кг; нафтопродуктів – $400 \cdot 10^6$ кг; сульфатів – $800 \cdot 10^6$ кг; хлоридів – $670 \cdot 10^6$ кг; азоту – $10 \cdot 10^6$ кг; нітратів – $60 \cdot 10^6$ кг; нітритів – $2 \cdot 10^6$ кг; СПАР – $0,25 \cdot 10^6$ кг; заліза – $0,770 \cdot 10^6$ кг; фосфатів – $7 \cdot 10^6$ кг. Технології, що включають процеси видалення сполук азоту і фосфору, мають істотні недоліки: частина з них забезпечує лише часткове їх видалення, частина потребує суттєвих додаткових витрат і застосування реагентів, що, у свою чергу, потребує застосування додаткових технологій утилізації утворених відходів. Показано актуальність необхідності розроблення нової технологічної схеми доочищення стічних вод.

Сучасні технологічні процеси не забезпечують екологічно безпечної утилізації осадів стічних вод. Проаналізовано основні існуючі методи стабілізації осадів та основні способи їх утилізації. Показано, що найбільш перспективною може бути утилізація осадів як органічних добрив з попередньою анаеробною стабілізацією. Наявні технології мають істотні недоліки, що не сприяє їх широкому впровадженню. Частина з них не забезпечує високих органолептичних показників стабілізованих осадів, інша частина дозволяє отримувати лише порівняно незначну кількість біогазу і вимагає значних затрат часу для завершення процесів бродіння, що не завжди забезпечує їх економічну ефективність. Доведено актуальність розроблення нової технологічної схеми анаеробної стабілізації осадів стічних вод з урахуванням біохімічних закономірностей бродильних процесів.

Проаналізовано існуючий стан вимірювання витрати та кількості стічних вод. Показано, що відсутність вимірювання потоків стічних вод на очисних спорудах пов'язана з відсутністю надійних і точних засобів вимірювання, що, у свою чергу, не дозволяє ефективно управляти процесами очищення і створювати ефективні системи автоматичного керування. Показано актуальність розроблення нової конструктивної схеми лічильника кількості стічних вод, стійкого до роботи із забрудненими рідинами і з малою похибкою вимірювання. Проаналізовано сучасні процеси очищення господарсько-побутових стічних вод, узагальнену технологічну схему яких зображено на рис. 1.

Проаналізовано існуючий стан використання обладнання для перекачування стічних вод і рециркуляційного активного мулу. Показано, що відцентрові насоси, що переважно використовуються на очисних спорудах, мають невисоку ефективність через роботу з надлишковими напорами і створення значних динамічних навантажень. Доведено актуальність розроблення нової конструктивної схеми шнекового насоса з можливістю налаштування необхідної висоти підняття, відсутністю динамічних навантажень та з більш високим, ніж у традиційних конструкцій ККД.

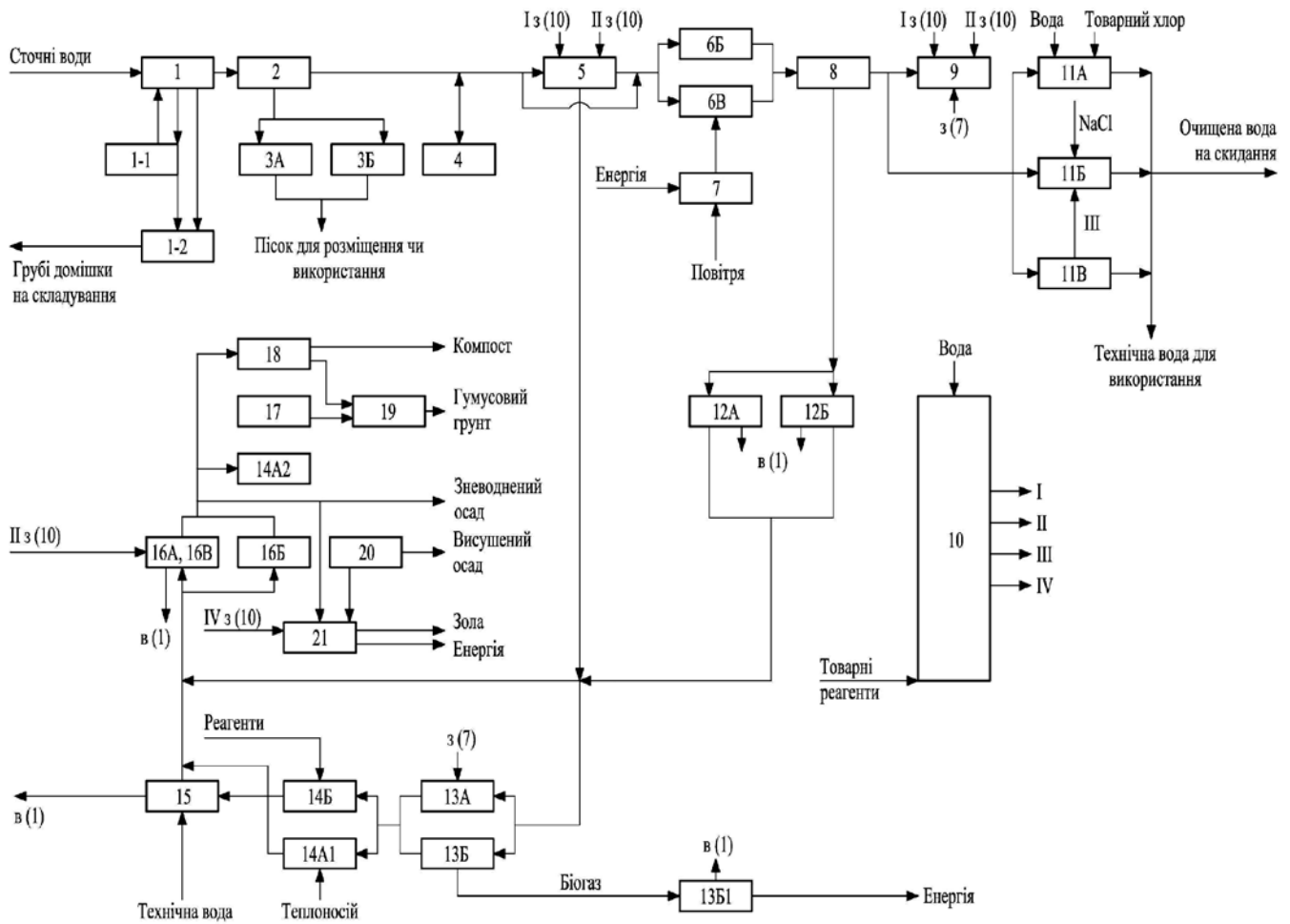


Рис. 1. Узагальнена технологічна схема очищення комунальних стічних вод

Для проведених у роботі досліджень основну базу склали праці таких вітчизняних та зарубіжних вчених, як Я. О. Адаменко, О. І. Запорожець, С. І. Азаров, М. Д. Пляцук, В. М. Шмандій, Л. І. Челядин (методи підвищення екологічної безпеки); М. Д. Гомеля, М. С. Мальований, В. Г. Петрук, В. М. Радовенчик, А. О. Дичко (удосконалення методів очищення стічних вод); Л. І. Гюнтер, Д. А. Данилович, D. Batstone, V.Q. Liao (удосконалення методів утилізації осадів стічних вод); К. Г. Арутюнян, В. Я. Карелін, С. М. Срібнюк (удосконалення методів перекачування стічних вод і їх осадів); П. П. Кремлевский, А. Ш. Кіясбейлі, Л. М. Ліфшиць (удосконалення методів вимірювання витрат та кількостей); С. В. Бойченко, К. Н. Сорокіна, P. Schlagermann, K. Sudhakar (удосконалення методів культивування енергетичних мікрроводоростей та виробництва з них біопалива).

Виділено основні недоліки традиційних процесів водовідведення, що спричиняють технічні та екологічні проблеми, що наведено в табл. 1.

Недоліки традиційних процесів водовідведення, що спричиняють технічні та екологічні проблемні ситуації

Недоліки існуючих технологічних процесів	Сутність проблемних ситуацій, спричинених недоліками існуючих технологічних процесів	
	Технічні проблемні ситуації	Екологічні проблемні ситуації
1. Скидання стічних вод у водойми без додаткового очищення від біогенних елементів	Незворотні втрати фосфору	Забруднення гідросфери залишковими концентраціями амонійного азоту, азоту нітритів, азоту нітратів, фосфатами. Результат – евтрофікація водойм
2. Використання для доочищення споруд типу біоплато і біоставки	Необхідність відведення значних площ для розміщення споруд та під санітарно-захисні зони	Недоотримання відновлюваних джерел енергії, що потенційно можуть бути отримані під час доочищення
3. Використання для доочищення стічних вод реагентних, сорбційних, біосорбційних методів	Необхідність складного обладнання, засобів автоматизації, висококваліфікованого персоналу, висока вартість реагентів	Недоотримання відновлюваних джерел енергії, що потенційно можуть бути отримані під час доочищення. Проблеми з утилізацією відходів
4. Утилізація осадів стічних вод без попередньої стабілізації	Проблемна імплементація багатьох способів утилізації через високу вологість, схильність до загнивання, вміст патогенних мікроорганізмів	Значні викиди у довкілля через енергозатратність зневоднення, надходження в атмосферу метану під час загнивання, надходження у літосферу патогенів за умови використання як добрива
5. Стабілізація осадів стічних вод у метантенках традиційної конструкції	Складнощі із забезпеченням неперервності процесу, значна тривалість бродіння (значні об'єми споруд), необхідність очищення біогазу та підвищення його калорійності	Недоотримання відновлюваного енергоносія – метану через неповноту розкладання органіки, додаткові викиди CO ₂ під час спалювання біогазу (через значний його вміст в останньому), надходження у довкілля патогенів через «проскоки» тощо
6. Застосування лоткових вимірювальних пристроїв кількості та витрати стічних вод	Низька точність вимірювання, технічні складнощі калібрування пристроїв	Зниження ступеня очищення стічних вод через низьку ефективність управління параметрами процесу очищення
7. Відсутність вимірювання кількостей та витрат	Складність керування потоками стічних вод всередині очисних споруд	Зниження ступеня очищення стічних вод через низьку ефективність управління їх потоками на очисних спорудах
8. Застосування відцентрових насосів для перекачування	Низький ККД фекальних відцентрових насосів, робота з надлишковими напорами	Зниження ступеня очищення за БСК через погіршення якості активного мулу, викликаного значними динамічними навантаженнями

У другому розділі показано, що для зниження екологічної небезпеки процесів водовідведення після біологічних методів очищення виникає необхідність у доочищенні стічних вод від біогенних елементів та в удосконаленні способів оброблення і утилізації їх осадів. Запропоновано використання стічних вод як середовища для культивування водних організмів. Серед найбільш перспективних обрано мікроводорості, біомаса яких може бути сировиною для виробництва біопалива третього покоління, швидкість приросту біомаси яких у разі перевищує швидкість приросту біомаси вищих водних організмів. Серед мікроводоростей, придатних для культивування запропоновано *Chlorella vulgaris* і *Botryococcus brownii*. Серед останніх виділяють три раси. Суха біомаса найбільш перспективної раси А містить до 85 % вуглеводнів, склад яких близький до складу сирої нафти.

Критично проаналізовано метод спалювання осадів стічних вод. На рис. 2, зображено залежність величини частки сухої органічної маси в сирих осадах від їх

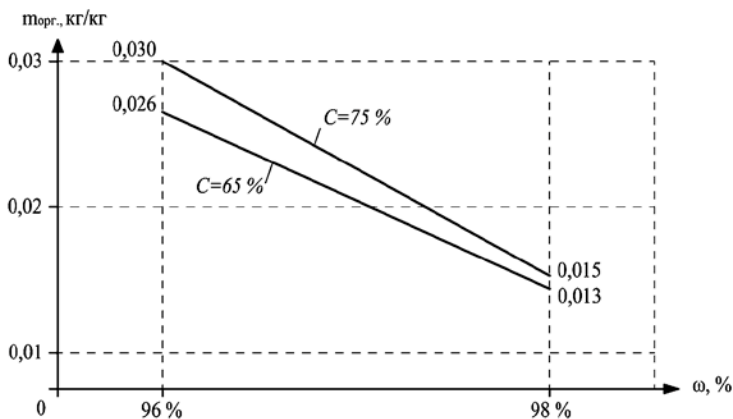


Рис. 2 – Залежність величини частки сухої органічної маси m у сирих осадах від їх вологості ω

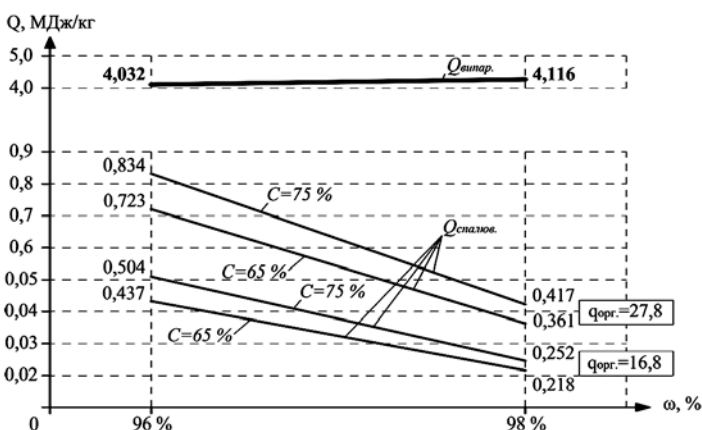


Рис. 3 – Залежність кількості теплоти, виділеної під час спалювання 1 кг ущільнених у мулоущільнювачах осадів $Q_{\text{спал}}$ та теплоти, затраченої на випаровування вологи $Q_{\text{вип}}$ від їх вологості ω

вологості, а на рис. 3 – залежність кількості теплоти, що виділяється під час спалювання 1 кг ущільнених у мулоущільнювачах осадів для двох крайніх значень нижчої теплоти згорання їх сухої органічної частини, а також залежність кількості теплової енергії, що затрачується на випаровування вологи з одного кілограма таких осадів від їх вологості. Через значну вологість (близько 98 %) осад господарсько-побутових стічних вод потребує значних витрат енергії на її зменшення перед спалюванням. Розглянуто тепловий баланс, а саме співвідношення між кількістю енергії, що виділяється під час спалювання сухої органічної частини осадів, та кількістю енергії, що затрачується на випаровування вологи в осадах.

Вологість ущільнених у мулоущільнювачах осадів коливається переважно у межах 96–98 %, а вміст органічних речовин у їх сухій масі – у межах 65–75 %. З рис. 2 видно, що за зміни вологості осадів лише на 2 % частка сухої

органічної маси в осадах змінюється вдвічі. Це демонструє одну з ключових ролей вологості у процесах спалювання. Нижча теплота згорання сухої органічної частини осадів може коливатися у межах $16,8 \cdot 10^6 - 27,8 \cdot 10^6$ Дж/кг. З рис. 3 видно, що кількість теплової енергії, необхідної на випаровування води, у кілька разів перевищує кількість теплової енергії, що виділяється під час горіння. Після механічного зневоднення вологість осадів може становити 75–85 %. На рис. 4

показано залежність величини частки сухої органічної маси від вологості таких осадів, а на рис. 5 – залежність кількості теплоти, що виділяється під час спалювання одного кілограма зневоднених осадів та тепла, що затрачується на випаровування води, від їх вологості. З рисунка видно, що під час спалювання осадів з $q_{орг.} = 16,8 \cdot 10^6$ Дж/кг навіть ущільнених до вологості 75 %, не дає позитивного енергетичного балансу. Для осадів з

$q_{орг.} = 27,8 \cdot 10^6$ Дж/кг і вмісту органічних речовин у їх сухій масі $c = 75$ % для отримання позитивного енергетичного балансу необхідно їх ущільнення до вологості менше 83,2 %, а якщо $c = 65$ % – до вологості менше 81,1 %.

За утилізації осадів з використанням як добавки до будівельних матеріалів або для рекультивації порушених територій також виникає необхідність значних затрат енергії на попереднє висушування. Використання осадів як органічного добрива на сільськогосподарських полях потребує їх попередньої стабілізації. Нестабілізовані осади є екологічно небезпечними, оскільки можуть містити патогенну мікрофлору, здатну роками виживати у довкіллі, а також схильні до загнивання з виділенням у атмосферу парникових газів (CH_4 , CO_2). Анаеробне зброджування утворює небезпеку загнивання та знищує патогенні мікроорганізми. Необхідним є попе-

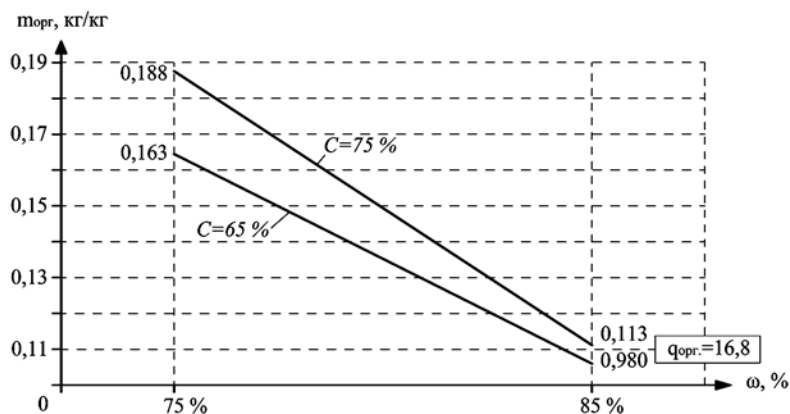


Рис. 4 – Залежність величини частки сухої органічної маси в механічно зневоднених осадах m від їх вологості ω

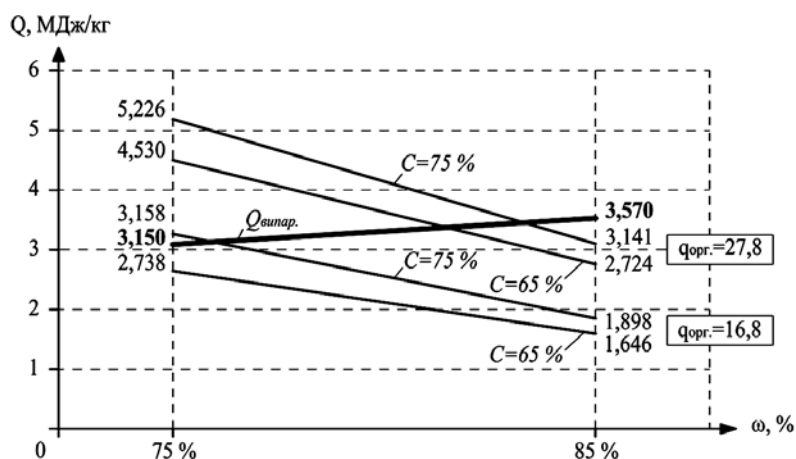


Рис. 5 – Залежність кількості теплоти, що виділяється під час спалювання 1 кг механічно зневоднених осадів, та кількості теплоти, що затрачується на випаровування води, від їх вологості

редне чищення осадів від солей важких металів через їх токсичність для анаеробної мікрофлори. Запропоновано чотиристадійне анаеробне збродження з подальшим використанням забродженої маси як органічного добрива.

Технологічну схему оновленої концепції водовідведення зображено на рис. 6. Господарсько-побутові та близькі до них за складом стічні води від об'єкта каналізування 1 надходять на очисні споруди механічного та біологічного очищення 2, після них направляються у фотобіореактор 5 для доочищення від біогенних елементів. У фотобіореактор подаються також мікрowodорості для культивування та частина вуглекислого газу, отриманого в установці анаеробного збродження 3, а також очищені в установці 7 димові газы, що також містять вуглекислий газ. Доочищені стічні води можуть використовуватися для технічних потреб.

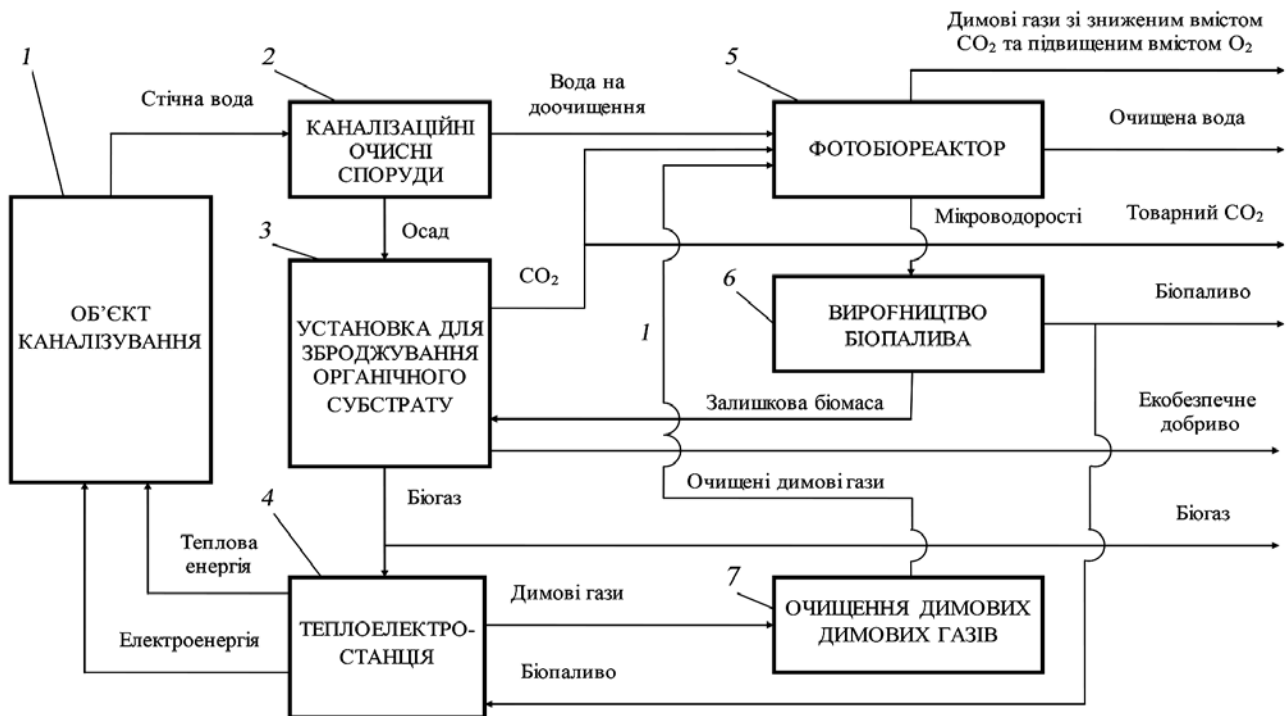


Рис. 6. Технологічна схема нового енергоефективного та екологічно безпечного процесу водовідведення

Видалений з фотобіореактора 5 урожай подається в установку видалення олій та виробництва біопалива 6, частина якого надходить на спалювання у місцеву теплоелектростанцію 4, а решта відводиться як товарне біопаливо. Осад стічних вод змішується із залишковою після відбирання олій біомасою та спрямовується в установку анаеробної стабілізації 3. Частина виробленого біогазу спрямовується до місцевої теплоелектростанції 4, а надлишок відводиться як товарне біопаливо. Димові газы теплоелектростанції направляються в установку для очищення 7, після якої подаються у фотобіореактор 5 для використання наявного в них вуглекислого газу у процесі фотосинтезу.

У третьому розділі проаналізовано переваги та недоліки відомих методів доочищення стічних вод від біогенних елементів. Показано, що біоставки, біоплато гідропонного типу, штучні ґрунтові споруди для фільтрації стічних вод крізь ґрунт не дозволяють отримувати суттєвих додаткових джерел енергії та потребують

відведення великих земельних. Показано перспективність використання стічних вод для культивування водних організмів, здатних поглинати біогенні елементи, що потребує незначних площ земель, що можуть бути неродючими. Серед водних культур обрано мікроводорості. Маючи велику швидкість росту, незважаючи на малі розміри особин (від $2 \cdot 10^{-6}$ до $50 \cdot 10^{-6}$ м), за сприятливих умов подвоюють свою масу до 8 разів на добу. Готові продукти не містять сірки, токсичних речовин (наприклад свинцю) і добре розщеплюються мікроорганізмами у довкіллі. Їх спалювання не призводить до збільшення концентрації CO_2 в атмосфері.

Оцінено можливу продуктивність культивування мікроводоростей для виробництва біопалива в Україні. Графічно масову продуктивність помісячно для регіонів України показано на рисунку 7.

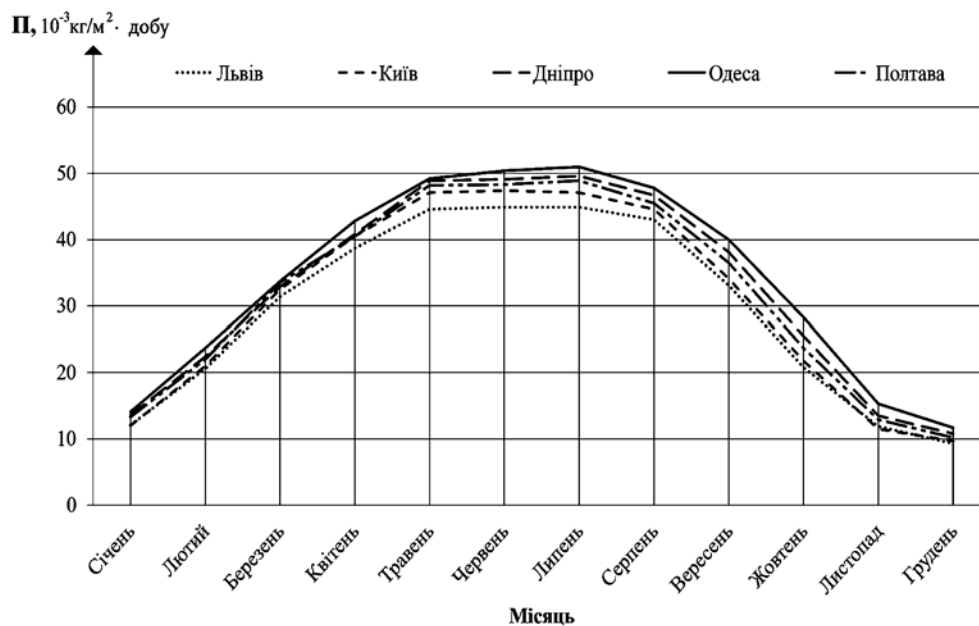


Рис. 7. Масова продуктивність культивування мікроводоростей в регіонах України

Питому річну очікувану масову та ліпідну продуктивність показано на рис. 8.

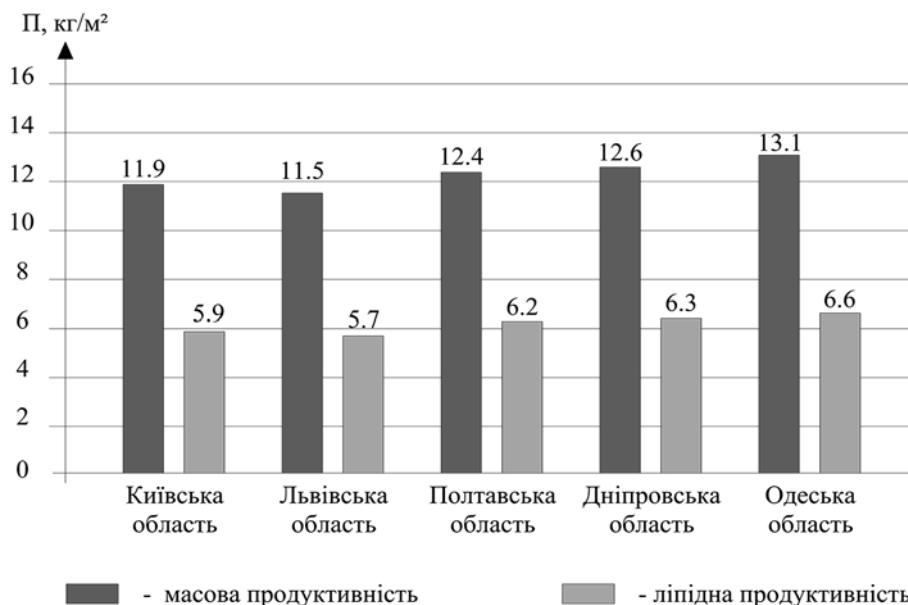


Рис. 8. Питому річна масова і ліпідна продуктивність культивування мікроводоростей на одиницю площі фотобіореактора у регіонах України, кг/м^2

Виконано енергетичні та емісійні розрахунки, на основі яких складено енергетичний баланс і баланс CO₂ під час виробництва та спалювання біопалива. Показано, що культивування мікроводоростей тільки для виробництва біопалива в погодних умовах України є енергетично та емісійно неефективним. Оцінювання енергетичної ефективності проведено відповідно до схеми виробництва, зображеної на рис. 9.



Рис. 9. Схема виробництва біопалива з мікроводоростей

Енергетичний баланс під час культивування мікроводоростей у закритих фотобіореакторах в умовах України показано на рис. 10, у відкритих – на рис. 11, з яких видно, що баланс для реакторів обох видів є позитивним. Він змінюється на негативний, якщо вважати, що споживана електрична енергія виробляється на теплових електростанціях. Енергетичний баланс з урахуванням прийнятого ККД теплових електростанцій з когенерацією 60 % для закритих фотобіореакторів в умовах України показано на рис. 12, для відкритих – на рис. 13.

Негативним є також баланс CO₂. Уникнені викиди в результаті використання біопалива у відношенні до здійснених викидів у процесі культивування та виробництва біопалива, складають: для закритих фотобіореакторів 88 %, для відкритих – 97 %. Таким чином, затрати енергії на виробництво на 15 % є вищими, ніж отримана енергія, а викиди CO₂ на 12 % вищі, ніж уникнені.

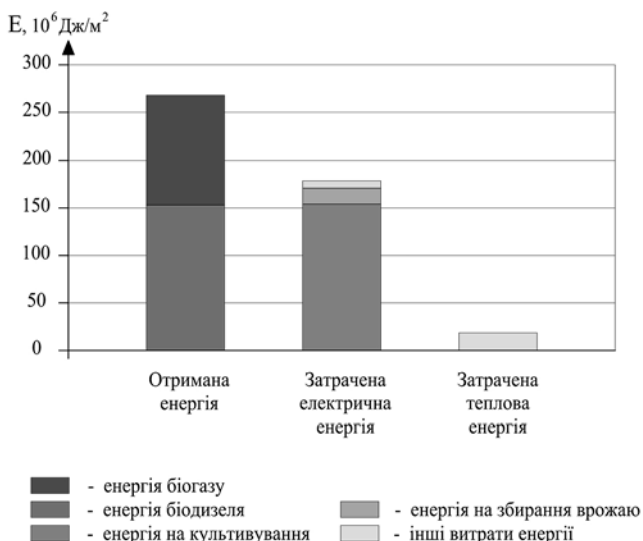


Рис. 10. Енергетичний баланс під час культивування мікроводоростей у закритих фотобіореакторах в умовах України



Рис. 11. Енергетичний баланс під час культивування мікроводоростей у відкритих фотобіореакторах в умовах України

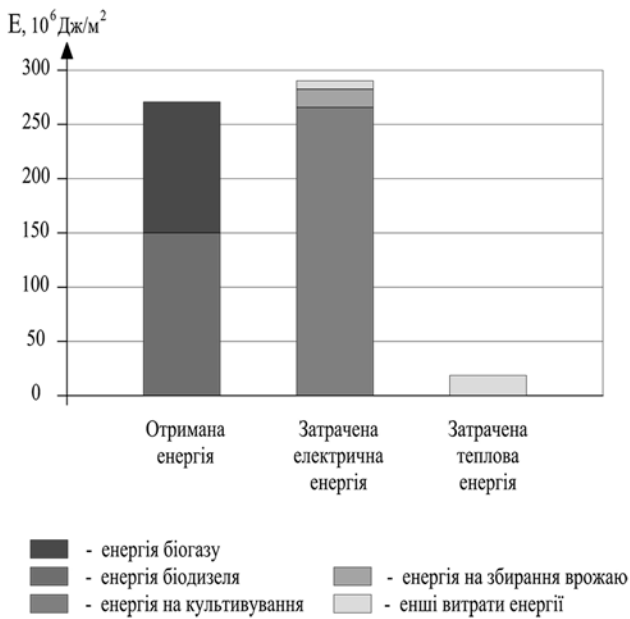


Рис. 12. Енергетичний баланс закритих фотобіореакторів в умовах України (з урахуванням ККД виробництва електроенергії)

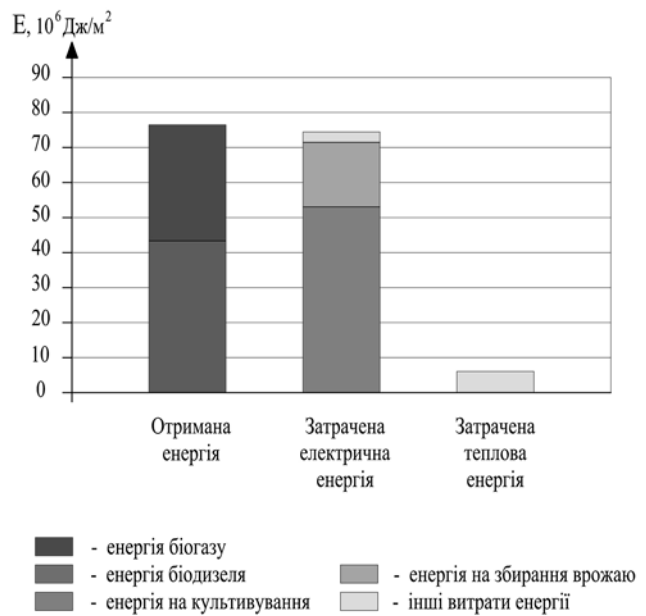


Рис. 13. Енергетичний баланс відкритих фотобіореакторів в умовах України (з урахуванням ККД виробництва електроенергії)

Проаналізовано переваги та недоліки відомих типів фотобіореакторів. Установлено, що недоліками фотобіореакторів відкритого типу є: вразливість до впливу природних умов, великі втрати CO_2 , складність забезпечення неперервності процесу. Недоліки фотобіореакторів закритого типу – складність подавання CO_2 всередину реактора, низька продуктивності через обмежену розчинність CO_2 у воді. Запропоновано методи інтенсифікації та оптимізації процесів культивування мікробіодоростей: використання очищених стічних як культуральної рідини; використання товарного CO_2 , отриманого під час зброджування осадів за запропонованою технологією; культивування за надлишкового тиску для збільшення розчинності CO_2 у воді; забезпечення можливості подавання CO_2 для збільшення продуктивності процесу; забезпечення безперервності процесу культивування.

Розроблено конструктивну схему фотобіореактора закритого типу неперервної дії для очищення стічних вод від біогенних елементів, яку зображено на рис. 14.

Конструкція являє собою корпус 3, виконаний у вигляді проточної прямокутної ємкості з відкритим верхом, усередині якого містяться прозорі трубки 4, з'єднані між собою колінами 5 і 13 таким чином, що утворюють зигзагоподібний змійовик, повністю занурений у проточні через внутрішню ємкість корпусу стічні води, очищені за допомогою мікробіодоростей. Фіксацію виконано так, щоб трубки були під кутом до горизонту, а коліна 13 з одного боку змійовика розташовані вище від колін 5 з його протилежного боку. На колінах 13 встановлено клапани 12 для скидання газів, що там накопичуються. До колін 5 через ніпеля 6 приєднано відгалуження від трубки 7, по якій у середину змійовика подається CO_2 з ємкості 9. Стічна вода, що підлягає очищенню, неперервно змішується з рециркуляційною частиною мікробіодоростей у змішувачі 1 і за допомогою нагнітача 2 прокачується через змійовик. Завдяки похилому розташуванню трубок 4 CO_2 барботує через суміш стічних вод з мікробіодоростями, підіймаючись до розташованих вище колін

13. Частина CO_2 розчиняється у стічних водах і стає джерелом вуглецю для метаболізму мікрободоростей, решта, разом з іншими газоподібними продуктами, видаляється через клапани 12, запобігаючи утворенню у змійовику газових пробок. Завдяки метаболізму відбувається приріст біомаси і зниження концентрації біогенних елементів у стічних водах. Після змійовика біомаса мікрободоростей видаляється у сепараторі 11, і розділяється на рециркуляційну, що спрямовується у голову фотобіореактора, а саме у змішувач 1, та надлишкову, що є сировиною для виготовлення товарних продуктів (біодизель, біогаз тощо). Очищені стічні води після сепаратора 11 за допомогою напрямного лотка 10 та розподільчого лотка 8 подаються у внутрішню ємкість корпусу 3 і повністю покриває собою змійовик. На протилежному кінці корпусу стічні води збираються збірним лотком 14 і видаляються з фотобіореактора відвідним лотком 15. Завдяки тому, що змійовик постійно занурений у проточні очищені стічні води, збільшується температурна інерція фотобіореактора та досягається його краща температурна стабілізація у холодну пору року. Послаблюється явище фотоінгібування метаболізму мікрободоростей у сонячні періоди через розсіювання прямих променів. Завдяки герметичності змійовика фотобіореактор може працювати під надлишковим тиском, що збільшує розчинність CO_2 у стічних водах. Надлишковий тиск забезпечується нагнітачем і виділенням кисню у процесі фотосинтезу, а підтримується скидними клапанами 12.

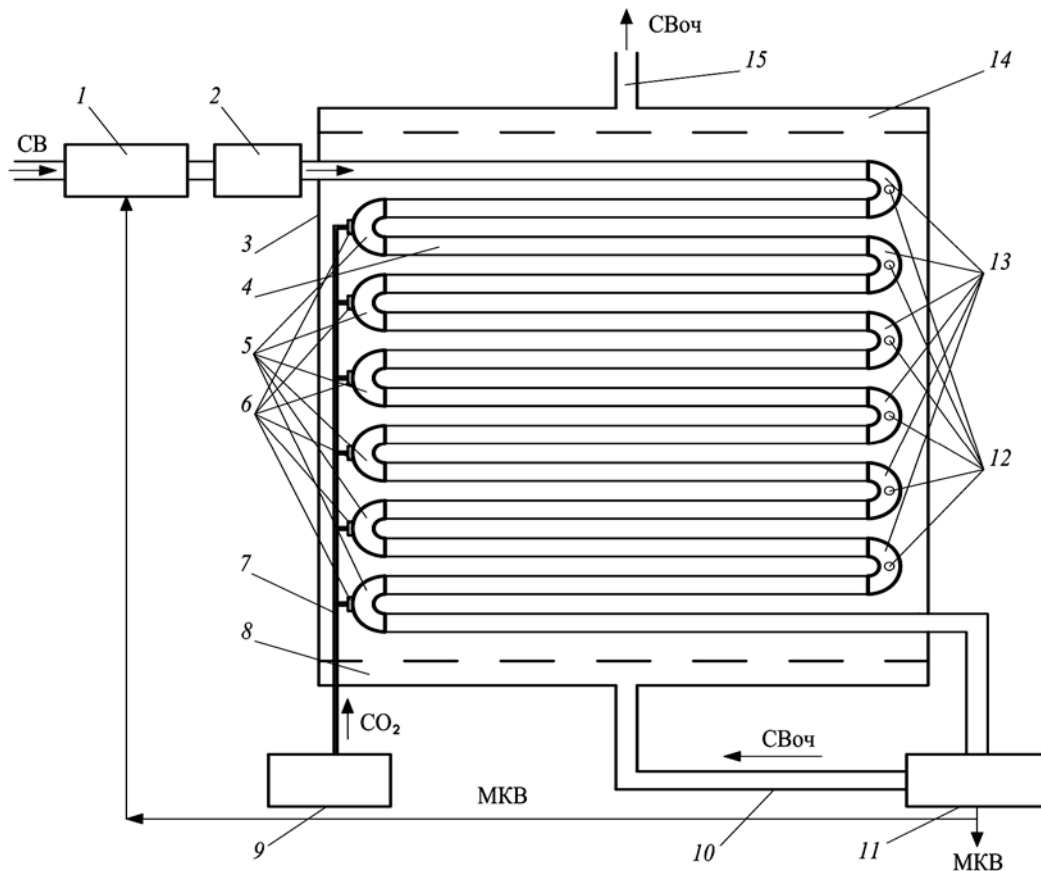


Рис. 14. Конструктивна схема фотобіореактора закритого типу безперервної дії
 СВ – стічні води на очищення; СВ_{оч} – очищені стічні води; МКВ – мікрободорості

Переваги запропонованої конструкції фотобіореактора: не потребує використання родючих ґрунтів; є закритою і нечутливою до впливів несприятливих погодних умов та можливого потрапляння у культуральну рідину потенційних інгібіторів росту біомаси; може використовувати як товарний CO₂, так і такий, що міститься у продуктах когенераційної установки; може здійснювати неперервний процес культивування та забезпечувати високий ступінь його автоматизації.

Для розроблення методу розрахунку фотобіореактора робочу ємкість розглянуто у вигляді циліндра, у якому велике відношення довжини до діаметра. Матеріальний баланс сполук для елементарного об'єму записано у вигляді

$$\frac{\partial S_i}{\partial t} = \left(-v_{xi} \frac{\partial S_i}{\partial x} - v_{yi} \frac{\partial S_i}{\partial y} - v_{zi} \frac{\partial S_i}{\partial z} \right) + k_d \left(\frac{\partial^2 S_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S_i}{\partial z^2} \right) + \mu_i, \quad (1)$$

де S_i – концентрація виду сполук біогенних елементів у стічній воді; x, y, z – просторові координати; v_x, v_y, v_z – просторові складові швидкості потоку стічної води; k_d – коефіцієнт дифузії; μ_i – питома швидкість поглинання біогенних елементів мікробами; t – час. Ліва частина формули (1) являє собою зміну концентрації біогенних елементів у часі для елементарного об'єму стічної вод. Перший доданок правої частини характеризує зміну концентрації за рахунок перенесення біогенних елементів у напрямку потоку, другий доданок – зміну концентрації за рахунок дифузійного перенесення, а третій – зміну концентрації за рахунок поглинання мікробами.

Після задання граничних умов у вигляді

$$-v_{xi} \frac{\partial S_i}{\partial x} = -v \frac{\partial S_i}{\partial L}, \quad -v_{yi} \frac{\partial S_i}{\partial x} = 0, \quad -v_{zi} \frac{\partial S_i}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

де L – довжина робочої зони реактора. Інтегруванням отримано формулу для визначення часу перебування стічної води у робочій зоні реактора для досягнення необхідного ступеня видалення біогенних елементів

$$t = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{1}{1 - K_i}. \quad (3)$$

де α – константа швидкості поглинання біогенної сполуки.

За формулою (3) можна визначати час перебування стічних вод у робочій зоні реактора для досягнення необхідного ступеня видалення біогенних сполук. Для цього потрібно визначити константи швидкості поглинання азотних та фосфорних сполук у конкретних умовах.

У четвертому розділі проаналізовано, систематизовано й узагальнено сучасні дослідження біохімії процесів анаеробного зброджування. Установлено, що головним недоліком існуючих технологій та конструкції метантенків є те, що не враховується стадійність процесу, коли працюють різні мікроорганізми:

гідролітичні, кислотогенні, ацетогенні та метаногенні. Через це бродіння займає тривалий час, метантенки конструюються великої ємкості, органіка не повністю розкладається до кінцевих продуктів і вихід біогазу через це є незначним. Дослідження свідчать, що сприятливі умови для більш вибагливих та повільно ростучих метанових бактерій пригнічують діяльність кислототворних бактерій, сповільнюють утворення продуктів їх життєдіяльності, які є джерелом живлення для ацетогенних, а далі для метаногенних бактерій тому кінцевий вихід біогазу зменшується. Сприятливі умови для кислотоутворювальних мікроорганізмів призводять до істотного зниження рН середовища, що інгібує діяльність метаноутворювальних бактерій. Тому в метантенку, як правило, намагаються створити гібридні умови, досягнувши певної рівноваги між активністю кислототворних та метанотворних бактерій. Очевидно, що такий підхід не має багато резервів для подальшого розвитку.

На відміну від більшості аеробних процесів, де мікроорганізми співіснують за принципом «хижак–жертва», в анаеробних процесах продукти життєдіяльності одних мікроорганізмів стають поживними елементами для інших. Процес бродіння

розглянуто як такий, що складається з чотирьох послідовних стадій: гідролізу, кислотогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Постадійну схему процесу зображено на рис. 15.

Швидкість росту кислотоутворювальних та метаноутворювальних бактерій збільшується, якщо їх відділити у просторі. Установлено, що оптимальними умовами для гідролізу є умови, за яких органічні сполуки швидко руйнуються. Для підвищення інтенсивності руйнування розглянуто такі методи інтенсифікації, як механічне подрібнення, додавання кислот, додавання лугу, нагрівання до високих температур, опромінення ультразвуком. Установлено, що опромінення ультразвуком у поєднанні з додаванням лугу має кращий ефект ніж усі попередні. Під дією ультразвуку в середовищі виникає кавітація, що спричиняє механічне руйну-

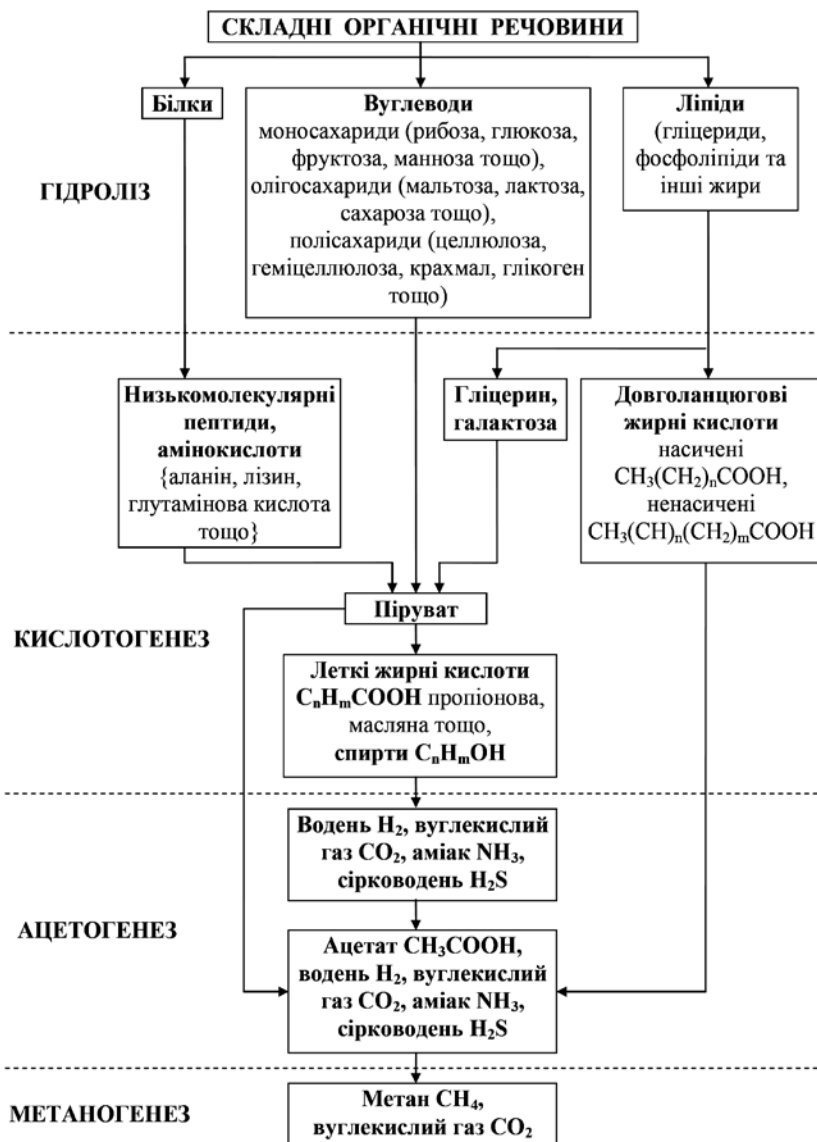


Рис. 15. Постадійна схема анаеробного бродіння

вання органіки. Підвищення інтенсивності опромінення для збільшення інтенсивності руйнування зумовлено збільшенням енергетичних затрат. Для їх зменшення запропоновано одночасне барботування осадів газом. Газові бульбашки стають центрами зародження кавітації, інтенсифікуючи її. Константа швидкості руйнування органічної складової збільшується до 2,6 разу, біологічної складової – до 4,3 разу. Підвищення тиску в середовищі, з одного боку, інтенсифікує захоплення кавітаційних бульбашок, тим самим збільшує локальне підвищення тиску та сприяє інтенсифікації гідролізу, а з другого боку, підвищує кавітаційний поріг, ускладнюючи саму появу кавітаційних бульбашок. Оптимальним значенням надлишкового тиску, за якого спостерігається максимальне значення константи швидкості руйнування органіки складає $0,5 \cdot 10^5$ Па. Порівняно з веденням процесу за атмосферного тиску константа органічної складової збільшується до 1,2 разу, а біологічної складової у 1,5 разу.

Розроблено технологічну схему гідролізатора для гідролізу осадів перед подачею їх у метантенк традиційної конструкції, що показано на рис. 16. У гідролізатор 2 подають свіжий осад 7 з додаванням рециркуляційного зброженого осаду з метантенка та додаванням NaOH 8.

У барботер 4 подають рециркуляційний біогаз 11 з метантенка. Барботуючи через осад, біогаз відводиться з верхньої частини гідролізатора через клапан і трубопровід 5, підтримуючи всередині надлишковий тиск $0,5 \cdot 10^5$ Па, що контролюється манометром 3. Опромінення осаду виконується ультразвуковим диспергатором 1, а поступове нагрівання тепло-генеруючою установкою 9 так, щоб до закінчення гідролізу температура осаду досягла значення, необхідного для подальшого бродіння. По завершенні гідролізу в осад додають розчин HCl для доведення рН середовища до значення у межах 6,5–7,6. Після цього осад подають у метантенк.

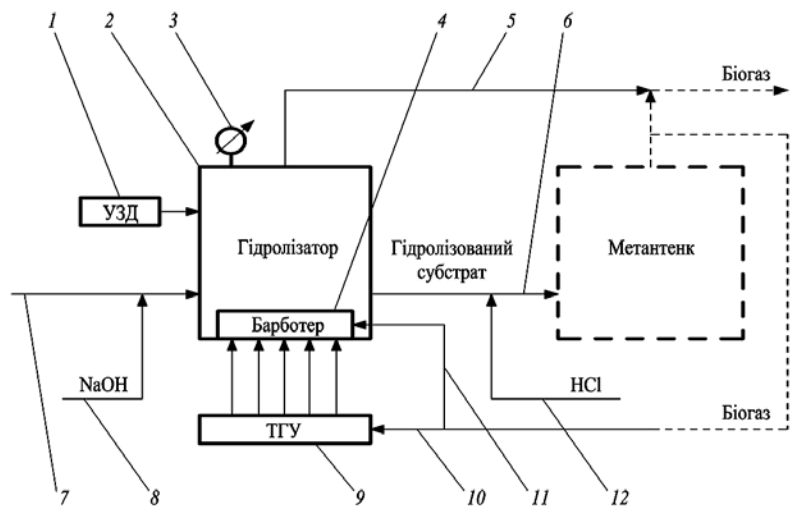


Рис. 16. Технологічна схема лужного гідролізу з ультразвуковою кавітацією та барботуванням

гідролізу температура осаду досягла значення, необхідного для подальшого бродіння. По завершенні гідролізу в осад додають розчин HCl для доведення рН середовища до значення у межах 6,5–7,6. Після цього осад подають у метантенк.

Головними кінцевими продуктами кислотогенезу є довголанцюгові жирні кислоти (ненасичені $\text{CH}_3(\text{CH}_n)(\text{CH}_2)_m\text{COOH}$ та насичені $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$), леткі жирні кислоти $\text{C}_n\text{H}_m\text{COOH}$ (пропіонова, масляна тощо), спирти $\text{C}_n\text{H}_m\text{OH}$. Як побічний продукт виділяється CO_2 та невелика кількість H_2 . Відбувається також дезамінування утворених амінокислот. У результаті з вивільненої аміногрупи NH_2 утворюється аміак NH_3 , що виділяється у вигляді газу. Якщо в осадах міститься сірка, то внаслідок сульфатредукції її сполук утворюється сірководень H_2S .

Важливе значення на цій стадії має парціальний тиск водню, що визначає склад кінцевих продуктів цієї стадії. Під час його збільшення кислотогенні бактерії активізуються, виробляючи етанол $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, пропіонову кислоту $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$,

масляну кислоту $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ та їх солі, а також інші леткі жирні кислоти. Через їх накопичення рН середовища знижується та може досягати 5,2–5,0. Якщо кислотогенну стадію здійснювати за атмосферного тиску, то CO_2 легко вивільняється і переходить у газоподібну форму. Метан майже не утворюється. Його частка становить 2–4 % від частки CO_2 . Виділяється на цій стадії переважно CO_2 , невелика кількість H_2 і CH_4 , можливі також домішки NH_2 і H_2S . Зі зниженням парціального тиску водню кислотогенез сповільнюється та активізуються ацетогенні бактерії. Через це недоутворюються кислоти, що на подальших стадіях могли б бути конвертованими у метан. Установлено, що для недопущення цього на цій стадії потрібно вводити у ємкість додаткову кількість водню, щоб підвищувати його парціальний тиск і активізувати кислотогенез. Ацетогенні мікроорганізми виробляють ацетат, розкладаючи довголанцюгові жирні кислоти, леткі жирні кислоти, спирти (перша група), а також відновленням CO_2 воднем (друга група). За низького парціального тиску водню активізується перша група, що водень виробляє, але сповільнюється діяльність другої групи, що водень використовує. За високого парціального тиску друга група активізується, а діяльність першої пригнічується до повного припинення діяльності. Тому на цій стадії потрібно підтримувати парціальний тиск водню не більше ніж 10 Па, що є оптимальним значенням, за якого обидві групи є активними. Необхідно підтримувати окиснювально-відновний потенціал середовища не нижче $330 \cdot 10^{-3}$ В. За нижчих значень активізується утворення водню та сульфідів і виділяється додаткова кількість H_2S . Процес потрібно здійснювати за атмосферного тиску, коли CO_2 легше виділяється в газоподібну фазу і може відводитись окремо.

Метаногени розщеплюють ацетат до CH_2 і CO_2 (перша група) і відновлюють CO_2 до CH_4 (друга група). Концентрація кисню вище $0,01 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ спричиняє їх загибель. За термофільного режиму допустиме коливання температури $\pm 0,2$ °С. Не рекомендовано інтенсивне перемішування через чутливість до динамічних навантажень. рН не повинно виходити за межі 7,5–8,0. Активізують метаболізм метаногенів біологічно активні домішки, зокрема мелафен (меламінова сіль біс(оксиметил)фосфінової кислоти). Присутність в органічних субстратах біостимуляторів типу BИOSTIM-SBC H_4 прискорює їх зброджування у 3–4 рази, а концентрація метану в біогазі збільшується.

Високий вміст CO_2 у біогазі за традиційних технологій бродіння пояснюється тим, що для ефективного функціонування другої групи метаногенів, що відновлюють CO_2 до CH_4 за допомогою водню, в метантенку недостатньо саме H_2 . З підвищенням тиску розчинність CO_2 у воді збільшується. Якщо тиск у метантенку підвищити до $0,5 \cdot 10^6$ Па, то CO_2 , що виділяється внаслідок функціонування першої групи метаногенів, швидко переходить з вільної форми у зв'язану, перестає виділятися у вигляді газу, насичує осад і прискорює метаболізм другого виду метаногенів. Виділення метану не залежить від тиску, оскільки він має погану розчинність у воді і швидко переходить у вільний стан. Розроблено технологічну схему анаеробної стабілізації, що зображено на рис. 17.

До свіжого осаду додають частину рециркульованого збродженого, взятого на виході з метантенка (як «закваску»), а також NaOH для початку лужного гідролізу. Суміш подається у гідролізатор 2 і опромінюється ультразвуком за допомогою

ультразвукового диспергатора 1, а компресором 14 нагнітається через барботер CO_2 , який надходить з блока очищення CO_2 5. Барботуючи через осад CO_2 відводиться через вихідний клапан, що підтримує надлишковий тиск $0,5 \cdot 10^5$ Па, для контролю якого передбачено манометр 3. Додаткового газовиділення в гідролізаторі не відбувається, тому відведений CO_2 направляють на змішування з CO_2 , отриманим на стадіях кислотогенезу і ацетогенезу та відводять як товарний газ. Протягом гідролізу теплогенеруюча установка 13 нагріває осад до 53°C . На виході з гідролізатора до осаду додається HCl для відновлення рН до значення 6,5–7,6.

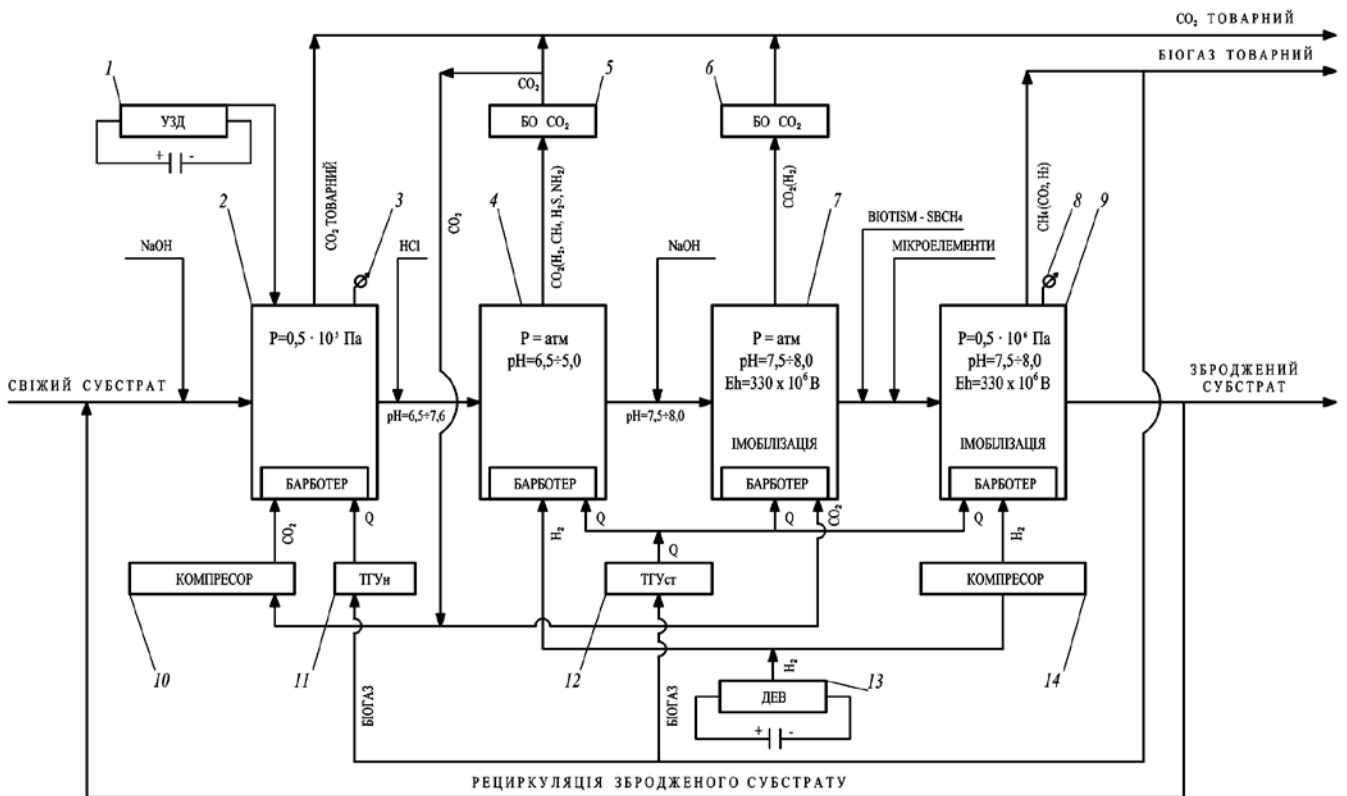


Рис. 17. Технологічна схема чотиристадійної анаеробної стабілізації

Осад подається у ємкість з барботером для кислотогенезу за атмосферного тиску, а в барботер подається водень від діафрагмового електрогенератора водню 11, що, розпилюючись, барботує крізь осад, перемішуючи його та підвищуючи свій парціальний тиск у ємкості. У ємкості виділяється переважно CO_2 , що відводиться та подається на блок очищення 5 від домішок H_2 , NH_3 , CH_4 , H_2S . Частина очищеного CO_2 відбирається компресором 4 і нагнітається для барботування у гідролізатор 2, решта відводиться як товарний продукт. Зупинення зниження рівня рН є ознакою того, що стадія завершилася. Після цього до осаду додається NaOH для відновлення рН до значень 7,5–8,0. Осад подається у ємкість для ацетогенезу 6 за атмосферного тиску, де встановлюють окиснювально-відновний потенціал на рівні $330 \cdot 10^{-3}$ В. У барботер подають вуглекислий газ для перемішування і сприяння діяльності першої групи ацетогенів. CO_2 (барботаажний і той, що виробляється на цій стадії) разом з вивільненим воднем відводяться через відповідну трубку. За постійного подавання та видалення CO_2 , з ємності видаляться і H_2 , що знижуватиме його парціальний тиск. До осаду додають біостимулятор типу *BIOSTIM-SBCH₄* і подають

у ємкість для метаногенезу 8. Компресором 14 нагнітають водень, що надходить від діафрагмового електрогенератору водню 13. Метан та невелика кількість вуглекислого газу, що утворюються, разом з уведеним для барботажу воднем відводяться у трубопровід транспортування біогазу через клапан, що підтримує тиск $0,5 \cdot 10^6$ Па. Частина біогазу відбирається з відповідного трубопроводу та направляється для спалювання в теплогенеруючі установки 11 і 12, що здійснюють температурну стабілізацію протягом кислотогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Після закінчення метаногенезу зброжений осад видаляється з ємкості. Його невелика частина по рециркуляційному трубопроводу направляється на змішування з новою порцією свіжого осаду, який подається у гідролізатор як «закваска». Решта відводиться на зневоднення та подальше використання як органічного добрива.

Розроблено конструктивну схему чотиристадійного шнекового метантенка безперервної дії (рис. 18) та його лабораторну модель (рис. 19).

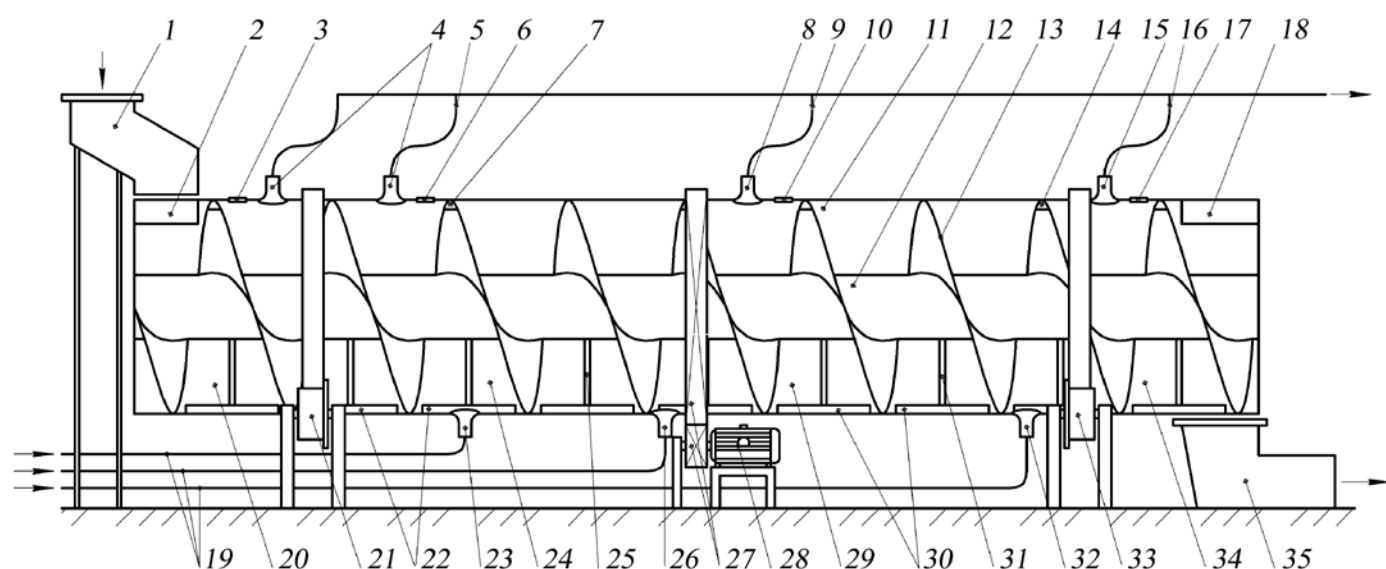


Рис. 18. Конструктивна схема шнекового чотиристадійного метантенка безперервної дії

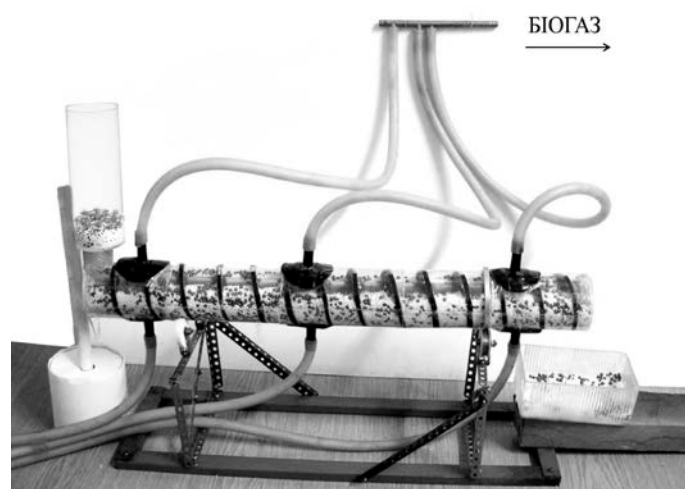


Рис. 19. Лабораторна модель шнекового метантенка безперервної дії

газова порожнина; 35 – приймальний пристрій.

1 – завантажувальний пристрій; 2 – завантажувальний люк; 3 – аварійний запобіжно-скидний клапан; 4 – ніпель; 5 – гнучкий шланг; 6 – аварійний запобіжно-скидний клапан; 7 – проріз; 8 – ніпель; 9 – гнучкий шланг; 10 – аварійний запобіжно-скидний клапан; 11 – циліндричний корпус; 12 – порожнистий вал; 13 – неперервна шнекова лопатка; 14 – проріз; 15 – ніпель; 16 – гнучкий шланг; 17 – аварійний запобіжно-скидний клапан; 18 – вивантажувальний отвір; 19 – гнучкі шланги; 20 – перша газова порожнина; 21 – опорні катки; 22 – теплообмінник; 23 – форсунка; 24 – друга газова порожнина; 25 – нерухома лопатка; 26 – форсунка; 27 – механічна передача; 28 – привід; 29 – третя газова порожнина; 30 – теплообмінник; 31 – нерухома лопатка; 32 – форсунка; 33 – опорні катки; 34 – четверта

У п'ятому розділі запропоновано класифікацію методів обліку стічних вод, що наведено на рис. 20. Показано перевагу інструментальних методів обліку.

Головними недоліками *електромагнітних* пристроїв є те, що електричні та магнітні поля викликають появу вихрових струмів у металевих частинах корпусу, що впливає на величину індукованої електрорушійної сили. Крім того, ці поля спричиняють виникнення електрохімічних процесів у стічній воді, що призводить до відкладень заряджених частинок на вимірювальних електродах, які через це поступово вкриваються шаром відкладень у вигляді слизу. Усе це спричиняє виникнення додаткових похибок вимірювання, знижує надійність та довговічність. Головними недоліками *ультразвукових* пристроїв є те, що ультразвукові хвилі розсіюються та змінюють свою швидкість, стикаючись з механічними включеннями в потоці, що може вносити значну неконтрольовану похибку в результати вимірювання. Звукові коливання пов'язані з фізичними коливаннями частинок середовища, що спричиняють зміну локального тиску по фронту поширення звукової хвилі, тобто спричиняють локальні деформації стискання та розтягування середовища. Вони є поздовжніми, тобто напрямком коливань збігається з напрямком поширення звукової хвилі. Оскільки для стічних вод є справедливим закон Гука, тиск, що виникає у точці проходження хвилі складається з абсолютного (початкового $P_{поч}$) та надлишкового (акустичного $P_{ак}$), який може бути як зі знаком «+», так і зі знаком «-»

$$P = P_{поч} + P_{ак} . \quad (4)$$

Акустичний тиск виражено функцією від густини середовища

$$P_{ак} = \frac{\partial P}{\partial \rho} d\rho . \quad (5)$$

Оскільки акустичний тиск є приростом абсолютного тиску, можна записати

$$d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial P} dP . \quad (6)$$

Забруднювальні домішки змінюють густину стічних вод, а отже, змінюють і швидкість поширення ультразвуку. Величина цих змін залежить від концентрації забруднень. Експериментальні дані свідчать, що швидкість ультразвуку змінюється зі зміною числа Рейнольдса, тобто зі зміною швидкості руху стічної води у трубопроводі. З урахуванням також залежності густини



Рис. 20. Класифікація методів обліку стічних вод

середовища від його температури отримано

$$d\rho = \left(\frac{\partial\rho}{\partial P}\right)dP + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)dT + \left(\frac{\partial\rho}{\partial D}\right)dD + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V}\right)dV, \quad (7)$$

де T – температура стічної води; P – тиск; D – концентрація забруднення (домішки) у стічній воді; V – швидкість стічної води у трубопроводі.

Оскільки $\frac{\partial P}{\partial \rho} = c^2$ можна записати $dP = c^2 d\rho$ або

$$d\rho = \left(\frac{1}{c^2}\right)dP + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)dT + \left(\frac{\partial\rho}{\partial D}\right)dD + \left(\frac{\partial\rho}{\partial V}\right)dV. \quad (8)$$

Після перетворень отримано

$$c^2 = \frac{dP}{d\rho - \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\right)dT - \left(\frac{\partial\rho}{\partial D}\right)dD - \left(\frac{\partial\rho}{\partial V}\right)dV}. \quad (9)$$

Показано, що похибка вимірювання у зв'язку зі зміною швидкості звуку у стічній воді визначиться як

$$\sigma(\Delta t) = \frac{c_2^2 - c_1^2}{c_2^2 - v^2} \cdot 100. \quad (10)$$

Розрахована похибка вимірювання становить $\pm 20\%$.

Показано, що робота пристроїв змінного перепаду тиску ґрунтується на вимірюванні різниці тисків на звуженні. Такі пристрої позбавлені всіх перерахованих недоліків і добре підходять для вимірювання витрат стічних вод. Проблемою є те, що вони використовуються сьогодні як витратоміри. Застосування стандартних вторинних пристроїв (показувальні та реєструвальні дифманометри) призводить до того, що кількість пройденого через прилад середовища за певний проміжок часу потрібно розраховувати у ручному режимі, користуючись записаними діаграмами витрати. Запропоновано принципову схему вимірювання витрати та кількості стічних вод, у якій обрахунок кількості проводиться інтегровальним перетворювачем за величиною витрати, яка визначається первинним перетворювачем за величиною імпульсу перепаду тиску, виміряного дифманометром. Сам первинний перетворювач складається зі звужувального пристрою (стандартна діафрагма, стандартне сопло, сопло Вентурі, труба Вентурі), корпусу дифкамери, імпульсних трубок, підвідної та відвідної ділянки трубопроводу, дифманометра. Витрата стічної води визначиться за формулою

$$Q = \alpha \varepsilon \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}}, \quad (11)$$

де α – коефіцієнт витрати; ε – коефіцієнт розширення середовища; d – діаметр отвору звужувального пристрою; ρ – густина вимірюваного середовища; ΔP – перепад тиску, виміряний дифманометром.

Запропоновано структурну схему інтегровального перетворювача (рис. 21). Вона складається з масштабного перетворювача 1, функціонального перетворювача 2, суматора 3, індикатора 4. Визначено похибку вимірювання витрати

запропонованим лічильником. Відносно похибку вимірювання кількості стічної вод визначено як середнє геометричне похибки вимірювання витрати первинним перетворювачем σ_Q та похибки обчислення вторинним перетворювачем $\sigma_{обч}$ за формулою

$$\sigma_W = \sqrt{\sigma_Q^2 + \sigma_{обч}^2}, \quad (12)$$

Середньоквадратичну похибку вимірювання витрати для стандартної діафрагми, стандартного сопла та сопла Вентурі визначено за формулою

$$\sigma_Q = \left[\sigma_\alpha^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + 0,25\sigma_{\Delta P}^2 + 0,25\sigma_\rho^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

де σ_{α_y} , $\sigma_{k_{Re}}$, $\sigma_{\Delta P}$, σ_ρ – середньоквадратичні відносні похибки відповідних величин: коефіцієнта витрати, коефіцієнта корегування витрати на число Рейнольдса, вимірювання перепаду тиску дифманометром та визначення густини стічної води.

Середньоквадратичну похибку вимірювання витрати для труби Вентурі визначено за формулою

$$\sigma_Q = \left[\sigma_\alpha^2 + 0,25\sigma_{\Delta P}^2 + 0,25\sigma_\rho^2 \right]^{1/2}, \quad (14)$$

Інтегрувальне перетворення здійснювалось за формулою

$$Q = \sum_{i=1}^n K \sqrt{\Delta P_i / \rho}, \quad (15)$$

де K – сталий коефіцієнт, визначений за формулою

$$K = 0,01252 \alpha K_t^2 d_{20}^2. \quad (16)$$

де K_t – поправковий коефіцієнт, що враховує теплову деформацію матеріалу звужувального пристрою, d_{20} – діаметр отвору звужувального пристрою за температури 20 °С.

Відносно похибку обчислення інтегрувальним перетворювачем визначено за середньоквадратичним відхиленням результатів операцій, що виконуються його окремими елементами за формулою

$$\sigma_{обч} = \sqrt{\sigma_{mn}^2 + \sigma_{анц}^2 + \sigma_{он}^2 + \sigma_{інд}^2}, \quad (17)$$

де σ_{mn} – відносна похибка масштабного перетворювача. Як масштабний перетворювач може використовуватися недорогий прецизійний попередній підсилювач постійного струму з диференційними виходами, побудований на інтегральній мікросхемі, наприклад К140УД13, у якого відповідно до технічних

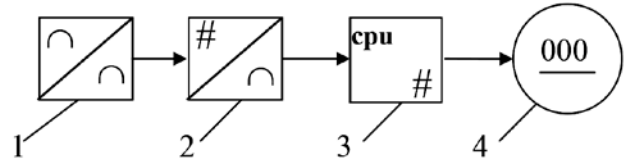


Рис. 21. Структурна схема інтегруючого перетворювача

умов (ТУ 11-БКО.348.095-07ТУ85) середньоквадратичне відхилення вихідного сигналу не перевищує $\sigma_{mn} = 0,0025\%$; $\sigma_{анц}$ – відносна похибка аналого-цифрового перетворювача (перетворювачі, що випускаються серійно мають похибку у межах 0,1–0,5%); $\sigma_{он}$ – відносна похибка обчислювального перетворювача, що визначається похибкою квантування та кількістю операцій (за використання десятирозрядної шини даних після виконання ста обчислювальних операцій, що є абсолютно достатньою для обчислення миттєвої об’ємної витрати, величина похибки не перевищує 0,001 %); $\sigma_{інд}$ – відносна похибка індикації витрати (якщо використовувати цифрові індикатори, похибка відсутня, тобто $\sigma_{інд} = 0$).

Розрахунок результуючої похибки вимірювання $\sigma_{вим}$ кількості стічної води для різних витрат і з використанням дифманометрів різного класу точності $S_{\Delta P}$ з використанням різних звужувальних пристроїв наведено табл. 2, 3 і 4.

Таблиця 2

Результати розрахунку результуючої відносної похибки вимірювання кількості стічних вод для діафрагми

Q , $\text{м}^3/\text{с} \times 10^{-3}$	σ_Q , %			$\sigma_{об}$, %	$\sigma_{вим}$, %		
	$S_{\Delta P}=0,4$	$S_{\Delta P}=0,25$	$S_{\Delta P}=0,15$		$S_{\Delta P}=0,4$	$S_{\Delta P}=0,25$	$S_{\Delta P}=0,15$
0,793	3,78621	2,67332	2,04876	0,5	3,819	2,719	2,109
1,181	2,17872	1,84416	1,68782	0,5	2,235	1,911	1,760
1,983	1,67664	1,62628	1,60517	0,5	1,749	1,701	1,681
3,966	1,59835	1,59524	1,59396	0,5	1,675	1,672	1,671

Таблиця 3

Результати розрахунку результуючої відносної похибки вимірювання кількості стічних вод для стандартного сопла і сопла Вентурі

Re	Q , $\text{м}^3/\text{с} \times 10^{-3}$	$\sigma_{вим}$, %		
		$S_{\Delta P}=0,4$	$S_{\Delta P}=0,25$	$S_{\Delta P}=0,15$
2×10^4	0,79325	3,18257	2,19668	1,62778
3×10^4	1,18988	1,76012	1,44185	1,28873
5×10^4	1,98313	1,27981	1,22823	1,20643
10^5	3,96626	1,19948	1,19615	1,19478

Таблиця 4

Результати розрахунку результуючої відносної похибки вимірювання кількості рідини лічильником з трубою Вентурі

Q , $\text{м}^3/\text{с} \times 10^{-3}$	σ_Q			$\sigma_{об}$	$\sigma_{вим}$		
	$S_{\Delta P}=0,4$	$S_{\Delta P}=0,25$	$S_{\Delta P}=0,15$		$S_{\Delta P}=0,4$	$S_{\Delta P}=0,25$	$S_{\Delta P}=0,15$
3,96626	2,703161	2,584116	2,533659	0,5	2,749014	2,632044	2,582524
5,94939	1,578198	1,535761	1,518008	0,5	1,655509	1,615104	1,598233
7,93252	1,045575	1,025139	1,016635	0,5	1,158978	1,140574	1,132937
11,8988	1,018577	1,014465	1,012774	0,5	1,134680	1,130990	1,129474

Графічно залежність похибки вимірювання від витрати для стандартної діафрагми і дифманометра класу точності 0,4 зображено на рис. 22, для стандартного сопла і сопла Вентурі (суцільна лінія), а також для труби Вентурі (штрихова лінія) – на рис. 23.

Виготовлено та випробувано дослідні зразки лічильників стічних вод змінного перепаду тиску діаметром умовного проходу 50 та 80 мм. Їх зовнішній вигляд показано на рис. 24, 25.

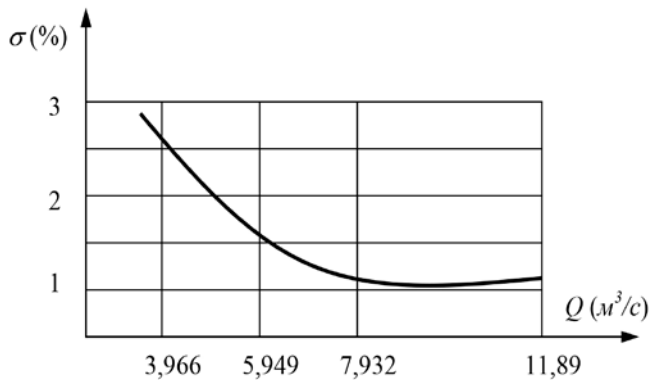


Рис. 22. Залежність похибки вимірювання від витрати для стандартної діафрагми

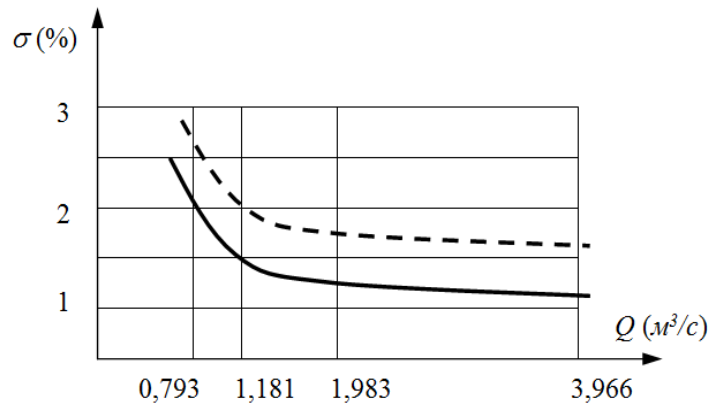


Рис. 23. Залежність похибки вимірювання від витрати для стандартного сопла, сопла Вентурі та труби Вентурі

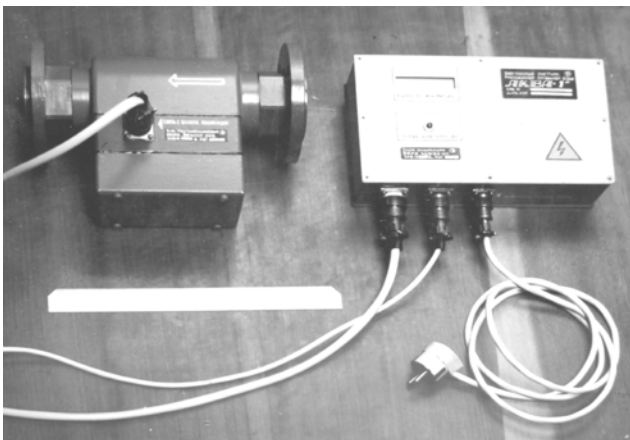


Рис. 24. Зовнішній вигляд дослідної моделі лічильника стічних вод змінного перепаду тиску $D_y = 50$ мм

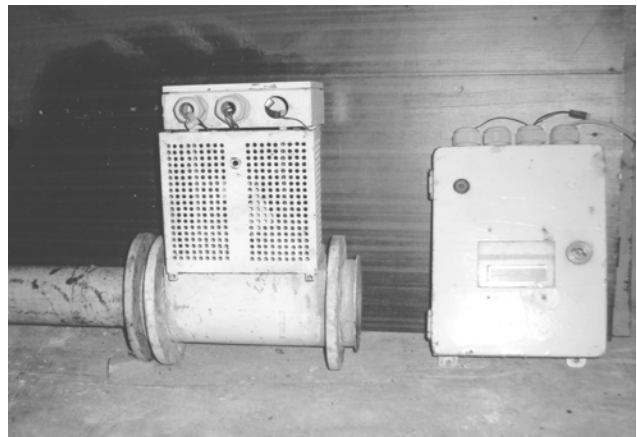


Рис. 25. Зовнішній вигляд дослідної моделі лічильника стічних вод змінного перепаду тиску $D_y = 80$ мм

Для забезпечення достовірності зчитування показників будь-яких лічильників кількості, у тому числі лічильників стічних вод, запропоновано встановлювати мінімальні інтервали часу між зчитуваннями, що забезпечать мінімальну різницю у показниках ΔP . Для її знаходження запропоновано загальну формулу

$$\Delta P = \frac{r}{2 \times \delta_p} \cdot 100, \quad (17)$$

де r – ціна одиниці молодшого розряду приладу, δ_p – достовірність зчитування показників (відносна похибка, що має бути задана наперед).

Використовуючи запропоновану модель, можна забезпечити необхідну наперед задану достовірність зчитування (максимальну відносну похибку).

У шостому розділі показано, що використання відцентрових насосів для перекачування стічних вод призводить до перевитрат електроенергії через створення надлишкових напорів, а під час перекачування рециркуляційного активного мулу – до погіршення його якості через значні динамічні навантаження. Запропоновано використання шнекових насосів, проаналізовано недоліки їх існуючих конструкцій. Головною для визначення теоретичної подачі запропоновано формулу

$$Q_{теор.} = W a n, \quad (18)$$

де W – об'єм води у міжлопатковому просторі насоса; a – кількість заходів шнека; n – частота обертання шнека.

Розглянуто схему шнекового насоса, що складається з маточини, на циліндричну поверхню якої по гвинтовій лінії навито лопатки (рис. 26).

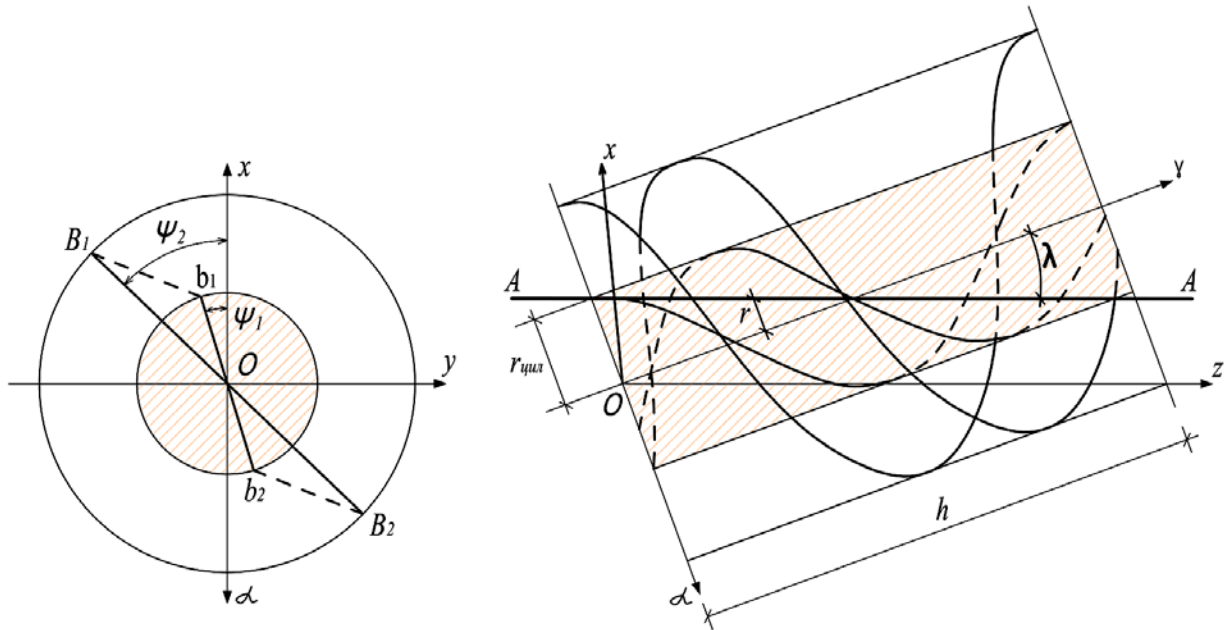


Рисунок 26. Розрахункова схема багатозаходного шнекового насоса

Для знаходження об'єму рідини у витку міжвинткового простору його розбито на нескінченно тонкі призми, ребра яких паралельні осі маточини шнека. Елементарний об'єм такої призми dV визначено як добуток довжини її ребра на площу поперечного перерізу

$$dV = \Delta\gamma r_{цил} dr_{цил} d\varphi \quad (19)$$

Проінтегровано формулу (19) за кутами повороту і радіальною координатою. У загальному вигляді для багатозаходного шнека, розрахункову схему якого показано на рис. 26, цей інтеграл можна записати так

$$V = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_r^{r_{цил}} \Delta\gamma r_{цил} dr_{цил} d\varphi + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_r^R \Delta\gamma r_{цил} dr_{цил} d\varphi + \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \int_r^{r_{цил}} \Delta\gamma r_{цил} dr_{цил} d\varphi. \quad (20)$$

Розв'язок рівняння (20) має вигляд

$$\begin{aligned}
 V = D \left\{ \frac{1}{192} \operatorname{ctg} \lambda \left[8\gamma_B^3 (\sin \psi_1 - \sin \varphi_1) - \frac{\pi \operatorname{ctg} \lambda}{\gamma_{III}} (\cos^2 \psi_1 - \gamma_B^2 \cos^2 \varphi_1) \right] \times \right. \\
 \left. \times \left(\frac{\operatorname{tg} \psi_1 - \operatorname{tg} \varphi_1}{\psi_1 - \varphi_1} (\cos^2 \psi_1 + \gamma_B^2 \cos^2 \varphi_1) - 6\gamma_B^2 \right) \right] + \\
 + \frac{1}{96} \operatorname{ctg} \lambda \left[\frac{3\pi (1 - \gamma_B^2)}{\gamma_{III}} \operatorname{ctg} \lambda (\cos^2 \psi_1 - \gamma_B^2 \cos^2 \varphi_2) + 4 (1 - \gamma_B^3) (\sin \psi_1 - \sin \varphi_2) \right] + \\
 + \frac{1}{192} \operatorname{ctg} \lambda \left[8\gamma_B^3 (\sin \psi_2 - \sin \varphi_2) - \frac{\pi \operatorname{ctg} \lambda}{\gamma_{III}} (\cos^2 \psi_2 - \gamma_B^2 \cos^2 \varphi_2) \right] \times \\
 \left. \times \left(\frac{\operatorname{tg} \psi_2 - \operatorname{tg} \varphi_2}{\psi_2 - \varphi_2} (\cos^2 \psi_2 + \gamma_B^2 \cos^2 \varphi_2) - 6\gamma_B^2 \right) \right\}. \quad (21)
 \end{aligned}$$

Для досліджень використовувалось два шнека діаметрами $D = 0,39$ м і $0,5$ м довжиною $L = 4,6$ м, та співвідношенням діаметрів $d/D = 0,5$ кожний. Установка дозволяла змінювати кут нахилу шнека α , частоту його обертання n , рівень води в каналі перед шнеком, а також зазор між самим шнеком та коробом δ , у якому він обертається. За результатами експериментальних досліджень розраховано складові їх ККД. Повний ККД визначався як добуток механічного $\eta_{\text{мех}}$, гідравлічного $\eta_{\text{гідр}}$, та об'ємного ККД $\eta_{\text{об}}$. Механічний ККД залежить від конструктивних особливостей насоса і для установки з електроприводом та одноступеневим редуктором його визначено на рівні $\eta_{\text{мех}} = 0,85$. Решту складових визначено як загальний гідравлічний ККД $\eta_{\text{заг.гідр}}$, значний вплив на величину якого мають перетікання рідини через зазори між лопатями шнека та лотком, в якому він обертається. За великих частот обертання значними стають також втрати через розбризування рідини. Для їх розрахунку введено поняття теоретичної подачі насоса як подачі за повної відсутності перетікань через зазори та відсутності розбризувань рідини. Розраховано об'ємний $\eta_{\text{об}}$ та гідравлічний $\eta_{\text{гідр}}$ ККД для шнекового насоса з такими

параметрами: діаметр шнека $D^1 = 0,39$ м, діаметр маточини шнека $d^1 = 0,195$ м, кут нахилу до горизонту $\alpha^1 = 30^\circ$, зазор між шнеком і лотком $\delta^1 = 5,2 \cdot 10^{-3}$ м. Частота обертання шнека змінювалась в інтервалі $n = 75 \dots 120$ хв⁻¹. Результати розрахунку об'ємного ККД наведено на рис. 27, гідравлічного ККД – на рис. 28, повного ККД – на рис. 29.

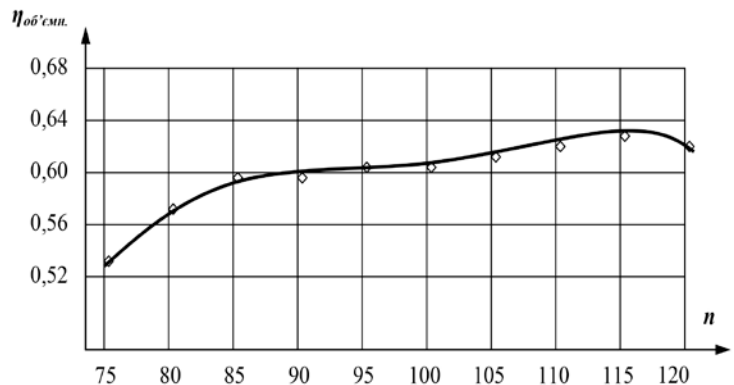


Рис. 27. Залежність об'ємного ККД шнекового насоса діаметром $0,39$ м від частоти обертання шнека

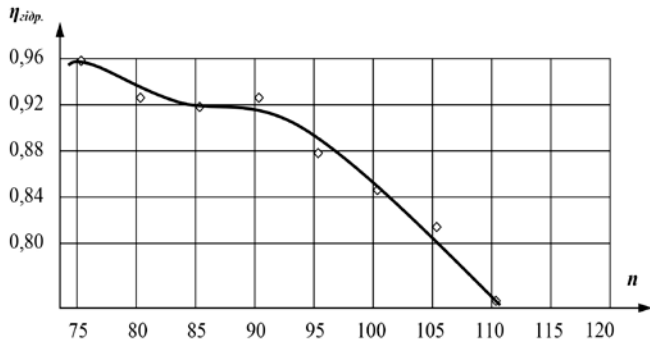


Рис. 28. Залежність гідравлічного ККД шнекового насоса діаметром 0,39 м від частоти обертання шнека

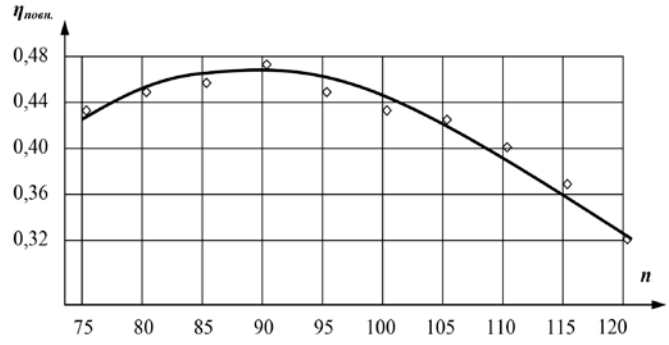


Рис. 29. Залежність повного ККД шнекового насоса діаметром 0,39 м від частоти обертання шнека

Розраховано об'ємний $\eta_{об}$ та гідравлічний $\eta_{гидр}$ ККД для шнекового насоса з такими параметрами: діаметр шнека $D^1 = 0,50$ м, діаметр маточини шнека $d^1 = 0,25$ м, кут нахилу до горизонту $\alpha^1 = 25^\circ$, зазор між шнеком і лотком $\delta^1 = 4,25 \cdot 10^{-3}$ м. Частота обертання шнека змінювалась в інтервалі $n = 75\text{--}115$ хв⁻¹. Результати розрахунку об'ємного ККД наведено на рис. 30, гідравлічного ККД – на рис. 31, повного ККД – на рис. 32.

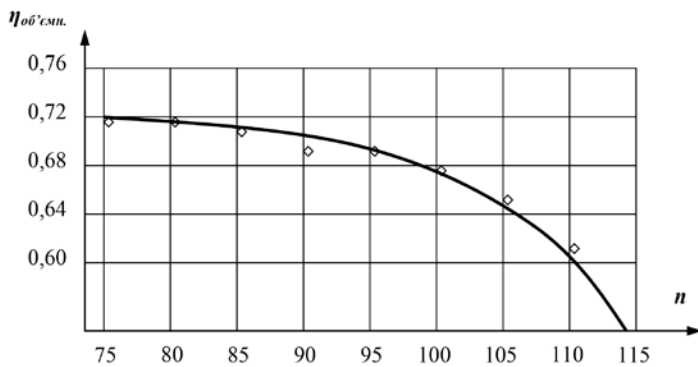


Рис. 30. Залежність об'ємного ККД шнекового насоса діаметром 0,5 м від частоти обертання шнека

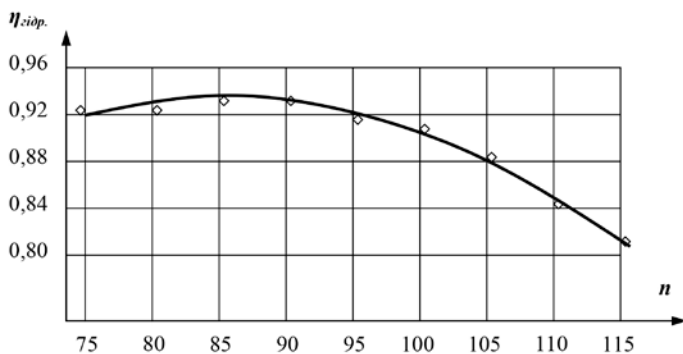


Рис. 31. Залежність гідравлічного ККД шнекового насоса діаметром 0,5 м від частоти обертання шнека

Для насоса $D^1 = 0,50$ м об'ємний ККД є низьким. Зі збільшенням частоти обертання шнека він поступово зростає аж до частоти 115 хв⁻¹, потім починає знижуватися. Це пояснено тим, що зі збільшенням частоти збільшується швидкість транспортування рідини секціями насоса, отже зменшується час перебування порцій рідини у секціях. За відносно постійної величини перетікання між секціями зі зменшенням часу загальний об'єм перетікань зменшується. За великих частот обертання (понад 115 хв⁻¹) зростає розбризкування та зменшується наповнення секцій насоса через динамічне викривлення вільної поверхні рідини й об'ємний ККД падає.

Гідравлічний ККД є високим за малих частот обертання. Його зниження зі збільшенням частоти обертання пояснено суттєвим зростанням швидкостей руху рідини у корпусі і, як результат, значне

збільшення втрат енергії на подолання тертя рідини об обмежувальні поверхні насоса та на подолання внутрішнього тертя, що виникає в результаті перемішування рідини.

Вищий об'ємний ККД для насоса $D^1 = 0,50$ м на менших частотах обертання пояснено тим, що у шнеків більших діаметрів ємкість кожної секції є більшою і перетікання між секціями, що є основною причиною зменшення об'ємного ККД, складають менший відсоток від ємкостей секцій. Гідравлічний ККД є досить високим за малих частот обертання та суттєво знижується під час їх збільшення. Це пояснюється тим, що за одних і тих самих частот обертання в шнеках більших діаметрів досягаються більші швидкості, особливо на периферійних ділянках. Тому зі збільшенням частот обертання втрати енергії на подолання сил тертя рідини об обмежувальні поверхні насоса та сил внутрішнього тертя від перемішування рідини зростають швидше.

Розроблено нову конструктивну схему насоса з високим об'ємним ККД (рис. 33). Конструкцію виконано у вигляді ротора-корпусу 1, що складається з маточини 2, неперервної шнекової лопатки та зовнішнього циліндричного лотка. Усі вони жорстко з'єднані між собою без зазорів і утворюють одну чи декілька (по кількості заходів шнека) безперервних спіральних наскрізних отворів. Замість нижньої опори ротор-корпус підтримується кількома парами опорних катків 4. Він приводиться у обертаний рух електродвигуном 5 через редуктор, що дозволяє регулювати частоту обертання. Разом з приводом його встановлено на рухомій частині рами, яка підтримується у вибраному положенні за допомогою пристрою для зміни кута нахилу 6. Нижня частина ротора-корпусу занурюється у резервуар з рідиною так, щоб рідина вільно входила у спіральний отвір і заповнила першу секцію міжлопатевого простору. Під час обертання ротора-корпусу рідина, що заповнила першу секцію, має переміщуватися спіральним каналом, одночасно зміщуючись вздовж осі ротора-корпусу у бік піднімання, доки не опиниться у верхньому резервуарі 8. Зазорів між лопатками шнека та циліндричним корпусом немає, тому перетікань так само немає. За малих частот обертання (до 100 хв^{-1}), коли майже відсутні розбризкування,

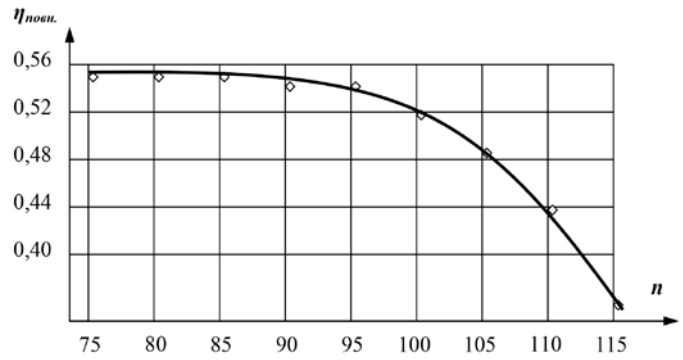


Рис. 32. Залежність повного ККД шнекового насоса діаметром 0,5 м від частоти обертання шнека

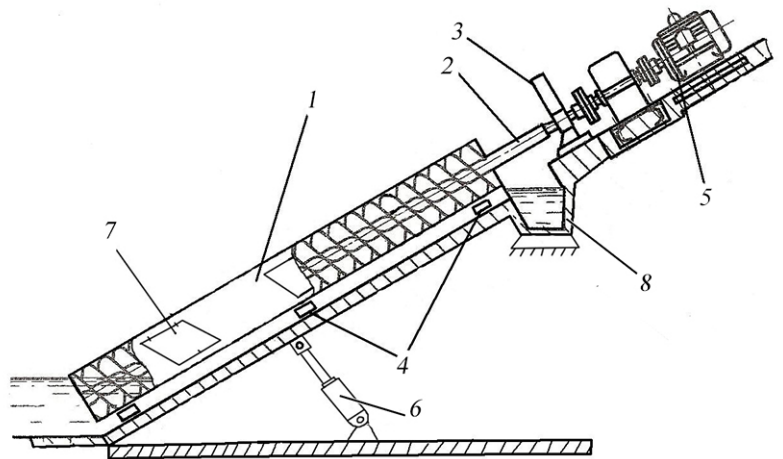


Рис. 33. Нова конструкція шнекового насоса з високим об'ємним ККД

об'ємний ККД буде близький до одиниці. Оскільки ротор-корпус закритий, для можливості прочищення необхідно забезпечити доступ до міжлопатевого простору. Для цього у циліндричному корпусі влаштовано герметично закритий люк 7.

Усе осьове і частину радіального навантаження сприймає опора з радіально-упорним підшипником 3, а основну частину радіального навантаження – опорні роликові катки з радіальними підшипниками 4. Через наявність зовнішнього циліндричного корпусу шнек є набагато жорсткішим і прогинається значно менше, а отже немає потреби влаштовувати нижню опору. Це дає насосу значну перевагу, оскільки нижня опора має працювати, будучи постійно зануреною у рідину, через що її виконують у вигляді підшипника ковзання з примусовим змащенням прес-маслянкою. Це, у свою чергу, потребує встановлення додаткового масляного насоса. Заміна сил тертя ковзання на сили тертя кочення суттєво збільшує механічний ККД. Відсутність нижньої опори дає змогу зробити шнековий насос не стаціонарним, як традиційні конструкції, а пересувним. Для цього раму можна розміщувати на шасі і переміщувати за допомогою тягача, чи відразу монтувати насос на шасі автомобіля.

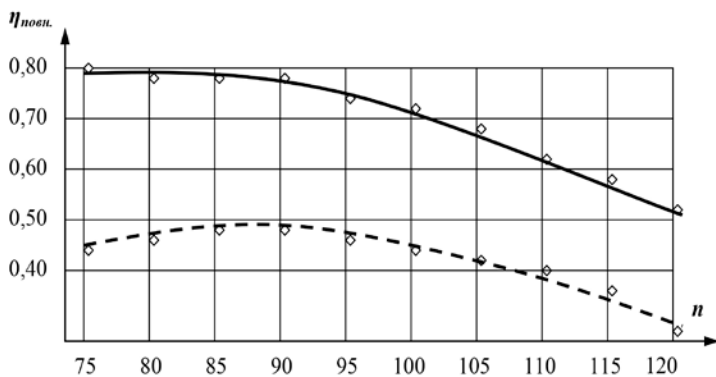


Рис. 34. Залежність повного ККД шнекового насоса нової конструкції діаметром 0,39 м від частоти обертання шнека

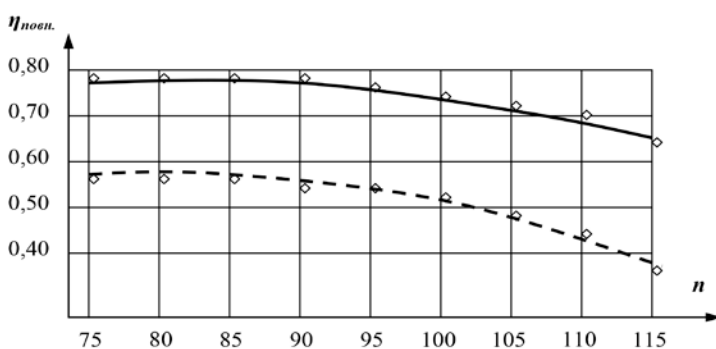


Рис. 35. Залежність повного ККД шнекового насоса нової конструкції діаметром 0,5 м від частоти обертання шнека

Для розрахунку повного ККД нової конструкції шнекового насоса взято значення механічного та гідравлічного ККД на рівні значень для традиційної конструкції. Об'ємний ККД для низьких частот обертання – $\eta_{об} = 0,98$. Результати розрахунку повного ККД порівняно з повним ККД традиційної конструкції для насоса $D^1 = 0,39$ м наведено на рис. 34, для насоса $D^1 = 0,50$ м – на рис. 35. На рисунках суцільною лінією показано ККД насоса нової конструкції, штриховою лінією – ККД насоса традиційної конструкції.

Виготовлено діючу демонстраційну модель шнекового насоса нової конструкції, що наочно підтверджує його стійку та стабільну роботу (рис. 36). Модель складається з рухомої та нерухомої частин рами 1, з пристроєм зміни кута нахилу 2, електродвигуна з редуктором 3 вихідною частотою обертання 96 хв^{-1} (живиться від джерела змінного

струму напругою 220 В), ротора-корпусу 4 (виконано з металевого однозаходного шнека та прозорої поліетиленової трубки, надітої на шнек з невеликим натягом) пари опорних катків 5, а також нижнього 6 та верхнього 7 резервуарів, що з'єднано між собою зливною трубкою 8. Для стабілізації роботи та запобігання

розбризуванню води на виході з насоса розміщено конічний відбійний козирок 9, вирізаний з тонкої гуми. Робота моделі демонструвалась для наочності за допомогою підфарбованої водопровідної води. Демонстрація показала стійку та безперебійну роботу моделі.

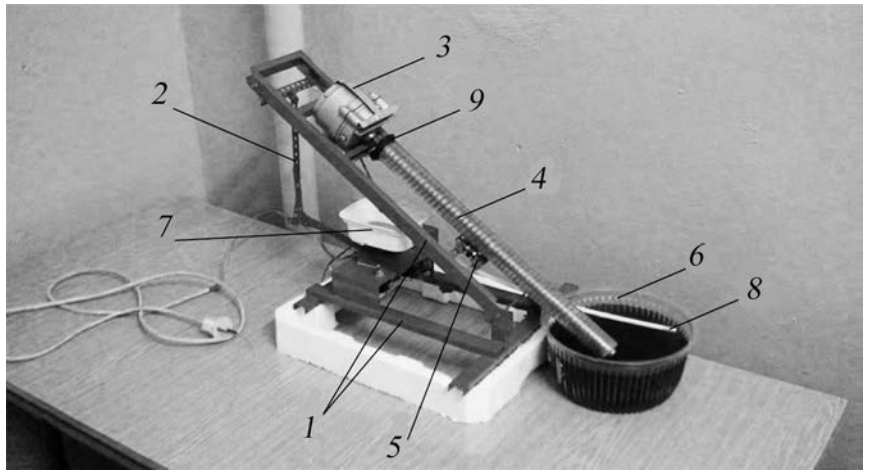


Рис. 36. Демонстраційна модель шнекового насоса нової конструкції

Нова конструкція насоса завдяки наявності у шнека зовнішнього циліндричного корпусу має більшу жорсткість. Це дозволяє не враховувати міцнісні показники і виготовляти ротор-корпус лише з урахуванням досягнення насосом максимальних робочих характеристик (максимальної подачі). Ураховуючи це, для економії металу шнек можна виконувати однозаходним. Визначено оптимальне співвідношення d/D , за якого площа змоченої поверхні лопатки F_{\max} є максимальною, а отже, максимальною є і ємкість секції W_{\max} . Отримано вираз для максимальної площі змоченої частини лопатки

$$F_{\max} = \frac{D^2}{8} \left[2\pi - 2 \arccos \left(\frac{2H_{\max}}{D} - 1 \right) \right] + \frac{D^2}{8} \sin \left[2 \arccos \left(\frac{2H_{\max}}{D} - 1 \right) \right] - \frac{\pi d^2}{4}. \quad (22)$$

Після деяких спрощень і диференціювання функції отримано

$$d\Psi = \left(\frac{1 - \cos 2 \arccos x}{4\sqrt{1-x^2}} - \frac{\pi}{2} x \right) dx. \quad (23)$$

Задача знаходження оптимального співвідношення зводиться до знаходження максимуму функції. За методом простих ітерацій отримано $x = 0,3034$ з точністю до третього знаку після коми. Отже, оптимальним співвідношенням є $d/D = 0,3$.

У цьому розділі виконано інтегральну оцінку екологічного ризику процесів водовідведення, а також проведено оцінювання економічної ефективності впровадження оновленої концепції водовідведення. Для оцінювання екологічного ризику використано метод додавання рівнів факторів ризику. Самі рівні визначено відношенням їх кількісних характеристик до базових величин. Розглянуто: фактори впливу на атмосферне повітря викидів метану та вуглекислого газу під час утилізації осадів комунальних стічних вод; фактори впливу на атмосферне повітря викидів вуглекислого газу під час культивування мікробіореакторів у фотобіореакторах з використанням стічних вод як культурального середовища з подальшим виробництвом біопалива з отриманої біомаси; фактори впливу на довкілля (гідросферу) надходження біогенних елементів у поверхневі водойми без

додакового очищення стічних вод і після додакового очищення з використанням запропонованої технології; фактори впливу на атмосферне повітря викидів вуглекислого газу із впровадженням шнекових насосів для перекачування стічних вод; фактори впливу на ґрунти надходження патогенних елементів під час утилізації осадів стічних вод.

Значення інтегрального екологічного ризику процесів водовідведення визначено за формулою

$$R_{ек} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha F_i \times 100, \quad (24)$$

де $R_{ек}$ – рівень екологічного ризику, %; F_i – безрозмірний рівень i -го фактора впливу; n – кількість факторів впливу, α – коефіцієнт кореляції.

Показано, що впровадження екологічно безпечних технологічних процесів водовідведення, розроблених у межах оновленої концепції водовідведення дозволяє знизити екологічний ризик процесів водовідведення з 43,18 % до 11,94 %, тобто на 31,18 %.

Для оцінювання економічної ефективності впровадження нової концепції водовідведення взято за основу каналізаційні очисні споруди середньостатистичного міста з населенням 250 тис. осіб і розраховано: економічний ефект реалізації чотиристадійного зброджування осадів стічних вод у чотирисекційних метантенках з розміщенням на території очисних споруд когенераційної установки для вироблення електричної і теплової енергії з отриманого біопалива – 415,86 млн грн/рік; економічний ефект реалізації технології додакового очищення стічних вод від біогенних елементів за допомогою мікроводоростей у закритих фотобіореакторах – 30,44 млн грн/рік; економічний ефект впровадження шнекових насосів нової конструкції для перекачування стічних вод – 5,23 млн грн/рік.

Оцінено капітальні витрати на впровадження запропонованих технологічних процесів і показано, що термін окупності переходу на оновлену концепцію водовідведення становить 0,59 року (7,08 місяців).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему зменшення шкідливого впливу на довкілля та життєдіяльність людини негативних чинників у процесі функціонування систем водовідведення удосконаленням екологічно безпечних технологічних процесів і створення устаткування, що забезпечить раціональне використання наявних відновлюваних ресурсів.

Основні наукові теоретичні та практичні результати досліджень можна узагальнити таким чином:

1. На основі аналізу технічних і екологічних характеристик основних процесів у водовідведенні науково обґрунтовано необхідність розроблення нової концепції водовідведення з використанням наявних потенційних можливостей отримання відновлюваних джерел енергії.

2. Розроблено та захищено патентом України на корисну модель нову екологічно

безпечну та енергоефективну концепцію водовідведення, що дозволяє знизити екологічну небезпеку та підвищити економічну ефективність водовідвідних систем. Концепція також дозволяє забезпечувати перехід господарсько-побутових очисних споруд від функціонування як техноекосистеми першого виду до функціонування як техноекосистеми другого виду, зменшувати скиди біогенних елементів у водні об'єкти, зменшувати викиди вуглекислого газу в атмосферу, отримувати альтернативні енергоносії і тим самим підвищувати їх енергетичну незалежність.

3. На основі енергетичних і емісійних розрахунків показано, що під час культивування мікроводоростей для виробництва біопалива третього покоління з використанням існуючих технологій в умовах України затрати енергії перевищують отримані від спалювання виробленого біопалива до 15 %, а емісія CO₂ перевищує уникнену емісію від заміни біопаливом традиційного до 12 %. Обґрунтовано доцільність поєднання процесів культивування з процесами очищення стічних вод від біогенних елементів.

4. На основі експериментальних даних і теоретичного аналізу та прогнозування обґрунтовано параметри об'єднаного процесу культивування енергетичних мікроводоростей з використанням стічних вод як культурального середовища та з одночасним їх очищенням від біогенних елементів. Показано, що на великих очисних спорудах евтрофікаційний потенціал очищених стічних вод знижується у 8,27 разу відносно біологічно очищених стічних вод.

5. Запропоновано захищені патентом України на корисну модель конструктивні рішення обладнання для культивування мікроводоростей з одночасним очищенням стічних вод від біогенних елементів, що дає змогу працювати у холодну пору року. Запропоновано методику розрахунку цього обладнання.

6. На основі енергетичних розрахунків показано недоцільність використання технологій спалювання осадів стічних вод через значні затрати енергії на їх зневоднення та висушування, обґрунтовано доцільність використання осадів як органічного добрива після попередньої анаеробної стабілізації. На основі аналізу процесів анаеробного бродіння обґрунтовано доцільність застосування кілька стадійних технологічних процесів зброджування. Показано, що застосування чортирстадійного технологічного процесу дозволяє товарний CO₂, а також збільшити вміст метану у біогазі з 60 % до 90 %.

7. Запропоновано захищені патентами України на корисну модель: технологічну схему гідролізатора та обґрунтовано параметри його роботи для попереднього оброблення осадів стічних вод разом із залишковою біомасою мікроводоростей перед подаванням їх у метантенки традиційної конструкції з метою інтенсифікації бродіння та збільшення виходу біогазу; технологічну схему чотири стадійної анаеробної стабілізації і обґрунтовано параметри її роботи. Розроблено та захищено патентом України на корисну модель конструктивні рішення метантенка для реалізації чотири стадійної технологічної схеми зброджування з можливістю отримання товарного CO₂ і біогазу з підвищеним вмістом метану, а також виготовлено фізичну модель метантенка.

8. Обґрунтовано доцільність використання методу змінного перепаду тиску як методу, що забезпечує меншу похибку вимірювання і стійкість робочих характеристик під час роботи із забрудненими рідинами, для вимірювання

кількостей та витрат стічних вод для забезпечення керування потоками на очисних спорудах. Запропоновано структурну схему лічильника кількості стічних вод на основі звужувальних пристроїв (первинних перетворювачів) і інтегровальних перетворювачів. Запропоновано структурну схему таких перетворювачів. На підставі розрахунків показано та експериментально підтверджено можливість вимірювання кількостей стічних вод з похибкою у робочому діапазоні не вищою ніж 1,5 % за умови використання стандартних діафрагм і стандартних сопел і в межах 2 % за умови використання труб Вентурі.

9. Виготовлено дослідні зразки лічильників кількості стічних вод діаметром умовного проходу 50 і 80 мм. Випробуваннями підтверджено можливість вимірювання кількості стічних вод у межах прогнозованої похибки.

10. Запропоновано удосконалений метод розрахунку складових ККД шнекових, на основі якого з використанням експериментальних даних обґрунтовано доцільність їх використання для перекачування стічних вод і рециркуляційного активного мулу. Показано можливі конструктивні зміни для підвищення загального ККД.

11. Запропоновано та захищено патентом України на корисну модель конструкцію шнекового насоса з ККД, що перевищує існуючі аналоги на 30 %. Виготовлено фізичну модель розробленої конструкції насоса.

12. Оцінено підвищення рівня екологічної безпеки під час переходу до оновленої концепції водовідведення. Показано, що інтегральний екологічний ризик процесів водовідведення зменшується з 43,18 % до 11,94 %. Термін окупності оновленої концепції 7,08 місяця.

13. Результати дисертаційної роботи використано під час розроблення нормативних документів державного рівня, зокрема трьох ДСТУ і трьох ДБН.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія

1. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Інноваційні екологічно безпечні технології у водовідведенні. Монографія. Київ. Видавництво «Центр учбової літератури», 2018. 320 с.

Розділи монографії

2. **Shamanskyi S.**, Boichenko S. Construction Arrangement for Cultivating Microalgae for Motor Fuel Production. *Systemy i Środki Transportu Samochodnego. Wybrane Zagadnienia. Monografia nr. 7. Seria: Transport.* Rzeszów. Politechnika Rzeszowska., 2016. P. 181–188.

3. **Shamanskyi S.**, Boichenko S. Chapter 11. Environment-Friendly Technology of Airport's Sewerage. *Advances in Sustainable Aviation. Under general editorship of Tahir Hikmet Karakoç, C. Ozgur Colpan, Yasin Şöhret.* Springer International Publishing AG, 2018. P. 161–175 (Scopus).

Статті у фахових виданнях

4. Лісіцин Є. Ф., Шаманський С. Й. Тандемна схема магістральних водопроводів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2007. №6. С.14–19.
5. Лісіцин Є. Ф., Шаманський С. Й., Іванов А. О. Розрахунок складових ККД шнекових насосів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2008. №3. С. 50–56.
6. Лісіцин Є. Ф., Шаманський С. Й., Іванов А. О. Шнековий насос з високим об'ємним ККД. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2008. №4. С. 110–115.
7. Лісіцин Є. Ф., Шаманський С. Й., Шульгін С. І. Оптимізація діаметра вала шнекового насоса з ротором-корпусом. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2008. № 6. С. 77–80.
8. Shamanskyi S. I., Lisicyn Y. F., Pochtovenko V. V. Continuously Working Screw Methane-tank. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2012. №3. С. 117–122.
9. Shamanskiy S. I. Credibility guaranteeing of meters readouts. *Proceedings of the National Aviation University*. 2015. №1(62). С. 53–55.
10. Шаманський С. Й. Установка для біоконверсії сонячної енергії безперервної дії. *Наукоємні технології*. 2015. №2 (26). С. 115–119.
11. Shamanskiy S. I., Boichenko S. V. Airline enterprises' wastewater measuring with a differential pressure water meter with a standard metering nozzle. *Proceedings of the National Aviation University*. 2015. №3. С. 140–147.
12. Шаманський С. Й., Бойченко С. В. Екологічно безпечний процес утилізації осадів стічних вод авіапідприємств із отриманням біогазу. *Нафтова галузь України*. 2016. №2. С. 35–39.
13. Бойченко С. В., Шаманський С. Й., Ільченко А. Я. Техніко-економічне порівняння методів попередньої обробки осадів стічних вод перед анаеробним зброджуванням. *Наукоємні технології*. 2016. № 4(32). С. 415–419.
14. Шаманський С. Й., Бойченко С. В., Павлюх Л. І. Моделювання масової та ліпідної продуктивності культивування мікроводоростей в умовах Київської області. *Енергетика: економіка, технології, екологія, НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського"*. 2017. №4. С.184–192.
15. Вовк О. О., Бойченко С. В., Шаманський С. Й., Бойченко М. С., Гладишева В. О. Перспективи мікробіологічного способу очищення стічних вод від біорезистентної фармацевтичної продукції. *Наукоємні технології*. 2018. №1(37). С. 87–95.
16. Шаманський С. Й., Бойченко С. В. Нормування гранично допустимих скидів біогенних елементів у водні об'єкти зі стічними водами в Україні. *Екологічні науки*. 2018. №21. С. 119–126.
17. Шаманський С. Й. Оцінювання енерго-економічної ефективності культивування мікроводоростей для виробництва біопалива в Україні. *Екологічна безпека*. 2018. №1(25). С. 52–60.

18. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В., Павлюх Л. І. Estimating of microalgae cultivation productivity for biofuel production in Ukraine conditions. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2018. №3. С. 112–119.

Статті у виданнях, що входять до міжнародних науково-метричних баз

19. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Енергоефективна та екологічно безпечна технологія стабілізації осадів стічних вод авіапідприємств. *Восточно-європейський журнал передових технологій*. 2015. №5/8 (77). С. 39–45 (**Scopus**).

20. **Shamanskyi S. I.**, Voichenko S. V. Development of Environmentally safe Technological Water Disposal Scheme of Aviation Enterprise. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. №6/10 (84). P. 49–57 (**Scopus**).

21. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Формирование технологических требований к процессу гидролиза органических соединений во время сбраживания осадков сточных вод авиапредприятий. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2015. № 5–6. С. 70–76 (**Ulrich's Periodicals Directory**).

22. **Шаманский С. И.**, Бойченко С. В., Матвеева И. В. Технологические основы организации экологически безопасного функционирования системы водоотведения. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2017. № 2. С. 59–66 (**Ulrich's Periodicals Directory**).

23. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Розрахунок метрологічних характеристик лічильника стічних вод змінного перепаду тиску. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №1. С. 72–78 (**РИНЦ**).

24. Voichenko M. S., Vovk O. O., Voichenko S. V., **Shamanskyi S. I.** Perspectives of wastewater purification from biorezistant pharmaceutical products and biogenic elements. *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2018. №3. С. 62–72 (**Ulrich's Periodicals Directory**).

Патенти

25. Пат. 28856. МПК E04B 7/00. №2007087955. Система магістрального водопроводу. Автори Лісіцин Є.Ф., **Шаманський С.Й.** Заявл. 03.08.2007. Опубл. 25.12.2007. Бюл. № 21. 4 с.

26. Пат. 33050. МПК F04D 3/00. №200801306. Шнековий насос. Автори Лісіцин Є.Ф., **Шаманський С.Й.**, Іванов А.О. Заявл. 01.02.2008. Опубл. 10.06.2008. Бюл. №11. 2 с.

27. Пат. 38724. МПК C12M 1/00. №200807065. Багатосекційний метантенк. Автори Лісіцин Є.Ф., **Шаманський С.Й.**, Почтовенко В.В. Заявл. 21.05.2008. Опубл. 12.01.2009. Бюл. № 1. 4 с.

28. Пат. 44202. МПК C12M 1/04. №200903271. Багатосекційний біоконвертор сонячної енергії. Автори Лісіцин Є.Ф., **Шаманський С.Й.**, Шульгін С.І., Почтовенко В.В. Заявл. 06.04.2009. Опубл. 5.09.2009. Бюл. № 18. 4 с.

29. Пат. 107470. МПК C12M 1/00, C02F 11/04, C02F 3/28. №201511640. Спосіб попереднього оброблення субстратів перед анаеробним зброджуванням. Автори **Шаманський С.Й.**, Бойченко С.В. Заявл. 25.11.2015. Опубл. 10.06.2016. Бюл. №11.4с.

30. Пат. 112599. МПК C02F 11/00, C12M 1/00. №201605942. Спосіб анаеробного зброджування органічних субстратів з отриманням біогазу. Автори **Шаманський С.Й.**, Бойченко С.В. Заявл. 01.06.2016. Опубл. 26.12.2016. Бюл. №24. 4 с.

31. Пат. 115528. МПК C02F 3/00, C02F 9/00, C12M 1/00. №201608591. Спосіб організації водовідведення. Автори **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Заявл. 05.08.2016. Опубл. 25.04.2017. Бюл. №8. 4 с.

Нормативні документи

32. ДСТУ Б В.2.2-32:2011. Будівлі мобільні (інвентарні). Системи санітарно-технічні. Загальні технічні умови. Розробники **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2013. 24 с.

33. ДСТУ Б В.2.2-33:2011. Будівлі мобільні (інвентарні). Електроустановки. Загальні технічні умови. Розробники: **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2013. 24 с.

34. ДСТУ Б Б.1.1-17:2013. Умовні позначення графічних документів містобудівної документації. Розробники: **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2013. 85 с.

35. ДБН Б.1.1-16:2013. Склад та зміст містобудівного кадастру. Розробники: **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2013. 57 с.

36. ДБН Б.1.1-21:2017. Склад та зміст схеми планування території на якій реалізуються повноваження сільських, селищних, міських рад. Розробники: **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2018. 18 с.

37. ДБН Б.2.2-12:2018. Планування і забудова територій. Розробники: **Шаманський С.Й.** та інші. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства, 2018. 179 с.

Матеріали і тези доповідей на науково-практичних конференціях

38. **Шаманський С. Й.** Облік стічних вод витратомірами змінного перепаду тиску. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства*. Міжнародна науково-практична конференція: 29–30 листопада 2012 р.: тези доп., Львів, 2012. С. 280–281.

39. Безугла О. В., **Шаманський С. Й.** Отримання біогазу переробкою органічних відходів у багатосекційних метантенках. *Екологічна безпека держави*. Всеукраїнська науково-практична конференція: 16–18 квітня 2013 р.: тези доп., Київ, 2013. С. 44–45.

40. **Shamanskyi S. I.**, Nestoriak D. M. Bioconversion of Solar Energy as a Perspective Direction in Alternative Energy. *Green Energy*. The 8-th International Green Energy Conference: 17–19 June 2013: тези доп., Київ, 2012. С. 371–372.

41. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В., Ільченко А. В. Зниження екологічних ризиків функціонування систем водовідведення авіапідприємств шляхом організації обліку стічних вод. *Авіа-2015*. XI Міжнародна науково-технічна конференція: 28–29 квітня 2015 р.: тези доп., Київ, 2015. С. 29.110–29.113.

42. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Технологічні вимоги до інтенсифікації гідролізу органіки під час зброджування осадів стічних вод авіапідприємств. *V Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю*. Міжнародна науково-практична конференція 23–26 вересня 2015 р.: тези доп., Вінниця, 2015. С. 183.

43. **Шаманський С. Й.**, Ільченко А. Я. Технологія гідролізу органіки як стадія анаеробного зброджування осадів стічних вод авіапідприємств. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*. II Міжнародна науково-практична конференція, 4–6 листопада 2015 р.: тези доп., Львів, 2015. С. 314–315.

44. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Екологічно безпечна технологія водовідведення авіапідприємства. *Новітні досягнення біотехнології та нанофармакології*. II Міжнародна науково-практична конференція, 22–23 жовтня 2015 р.: тези доп., Київ, 2015. С. 127.

45. **Shamanskyi S.**, Boichenko S. Green Integrated Sewage Treatment Technology of Airport. *International Symposium on Sustainable Aviation*, May 29 – June 1. Istanbul, 2016. P. 69.

46. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Екологічні проблеми утилізації осадів стічних вод в Україні. *Актуальні проблеми енергетики та екології*. XVI Всеукраїнська науково-практична конференція, 5–7 жовтня: тези доп., Одеса, 2016. С. 126–127.

47. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Нова технологія водовідведення авіапідприємства в контексті підвищення екологічної безпеки його функціонування. *Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика*. Всеукраїнська науково-практична конференція, 24 листопада: тези доп., Харків, 2016. С. 118.

48. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Екологічно безпечна технологія водовідведення. *Екогеофорум 2017. Актуальні проблеми та інновації*. Міжнародна науково-практична конференція, 22–25 березня: тези доп., Івано-Франківськ, 2017. С. 154–156.

49. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Технологічні вимоги до організації екологічно безпечного водовідведення. *VI Всеукраїнський з'їзд екологів з міжнародною участю*. Міжнародна науково-практична конференція, 20–22 вересня 2017 р.: Вінниця, 2017. С. 45.

50. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В. Культивирование микроводорослей в сточных водах для производства биотоплива. *Современные энергетические установки на транспорте, технологии и оборудование для их обслуживания (СЭУТТОО-2017)*. Международная научно-практическая конференция, 28–29 сентября 2017 г.: Херсон, 2017. С. 333–334.

51. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В., Павлюх Л.І. Очищення стічних вод за допомогою мікроводоростей. *Проблеми екологічної безпеки*. XV Міжнародна науково-технічна конференція, 11–13 жовтня 2017 р.: Кременчук, 2017. С. 74.

52. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В., Павлюх Л. І., Бойченко М. С. Оцінка масової та ліпідної продуктивності культивування мікроводоростей в умовах Київської області для виробництва біопалива. *Modern methods, innovations and experience of practical application in the field of technical sciences*. International research and practice conference, December 27–28, 2017: Radom, Republic of Poland, 2017. P. 87–90.

53. **Шаманський С. Й.**, Бойченко С. В., Адениї К. О. Економічна оцінка виробництва біопалива з мікроводоростей в Україні. *Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи*. III Міжнародна науково-практична конференція, 14 вересня 2018 р.: Львів, 2018. С. 214.

54. **Шаманський С. И.** Экономическое обоснование применения биотоплива третьего поколения в Украине. *Наука – образованию, производству, экономике*. Материалы 16-й Международной научно-технической конференции (71-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), том 2, Минск, 2018. С. 72.

АНОТАЦІЯ

Шаманський С. Й. Науково-технологічні засади удосконалення екологічно безпечних процесів водовідведення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 21.06.01 – Екологічна безпека. – Національний авіаційний університет. – Київ, 2019.

Дисертацію присвячено вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення екологічної безпеки функціонування систем водовідведення шляхом удосконалення наявних та створення нових екологічно безпечних технологічних процесів та створення устаткування, що забезпечить раціональне використання наявних відновлюваних ресурсів та зменшення шкідливих впливів систем водовідведення на довкілля. Розглянуто різні методи організації водовідведення, охарактеризовано їх основні спільні недоліки. Показано, що сучасні технології водовідведення не дозволяють досягати належного рівня екологічної безпеки переважно через недостатній ступінь очищення стічних вод від біогенних елементів та наявні екологічні ризики, пов'язані з утилізацією їх осадів. Зроблено висновок, що під час застосування традиційних механічних і біологічних методів очищення виникає необхідність у доочищенні стічних вод від біогенних елементів та в удосконаленні способів оброблення і утилізації їх осадів. Як один з найбільш перспективних методів доочищення запропоновано використання стічних вод як середовища для культивування енергетичних мікроводоростей у фотобіореакторах закритого типу з подальшим виробництвом рідкого біопалива третього покоління. Як один з найбільш перспективних методів оброблення та утилізації осадів запропоновано інтенсивне анаеробне зброджування з організацією процесу у відповідності з кінетикою процесів бродіння та подальшим використанням забродженої маси як органічного добрива. Обґрунтовано необхідність та розроблено засоби вимірювання

витрат стічних вод змінного перепаду тиску. Обґрунтовано доцільність використання та запропоновано конструкцію шнекового насоса з високим ККД.

На підставі цього запропоновано оновлену концепцію водовідведення, що дозволяє підвищити ступінь очищення стічних вод, отримувати відновлювані енергоносії для часткового чи повного забезпечення потреб підприємства у тепловій та електричній енергії, а в разі надлишку – товарні відновлювані енергоносії, отримувати екологічно безпечне органічне добриво, товарний вуглекислий газ, а також зменшити викиди вуглекислого газу в атмосферу.

Ключові слова: біогаз, біопаливо, екологічна безпека, осади стічних вод, технологічні засади, удосконалення технологічних процесів, водовідведення.

ABSTRACT

Sergii I. Shamanskyi – Scientific and technological foundations of improvement of ecological safety processes of sewerage. – Manuscript.

Thesis for the degree of doctor of technical sciences in specialty 21.06.01 – Ecological safety. – National Aviation University. – Kyiv, 2019.

Thesis is dedicated to solving scientifically applied problem of increasing of ecological safety of sewage systems functioning by improvement of existing technological processes and creation of new ecologically safe technological processes. It is also dedicated to creation of equipment, which will provide rational use of present renewable resources and diminishing of harmful influences of sewage systems on natural environment. The different methods of organization of sewage systems are considered and their basic general drawbacks are described. It is shown that modern technologies of sewerage do not allow achieving the proper level of ecological safety mainly through the insufficient degree of sewage water treatment and ecological risks, related to utilization of their sludges.

A conclusion is drawn, that at application of traditional mechanical and biological methods of treatment there is necessity for additional purification of sewage waters from biogenic elements and in improvement of methods of treatment and utilization of their sludges. Biogenic elements, such as nitrogen and phosphorus, are present in wastewater in the form of various compounds. While getting into the water bodies, they can cause eutrophication processes, which leads to the death of aquatic organisms and decrease in environmental safety. Ecological risks are especially high in the case of using the water body for recreational purposes or for water supply. Eutrophication results in cyanobacteria development, which leads to the appearance of cyanotoxins in the water. The last ones are regarded as pathogens, despite the fact that they do not develop in the human body. At the same time, it has been shown that cultivation of microalgae for biofuel production on an industrial scale faces a number of difficulties, primarily economic ones. Ensuring the metabolism of microorganisms requires large amounts of water, nutrient (biogenic elements), as well as electricity for mixing in order to ensure uniform illumination. In the cold period, heating and temperature stabilization are also necessary. As one of the most perspective methods of additional treatment is offered using of sewage waters as environments for cultivation of power microalgae in photobioreactors of the closed type with subsequent production of liquid biofuel of the third generation.

As one of the most perspective methods of treatment and utilization of sludges is offered intensive anaerobic digestion with organization of the process in accordance with kinetics of digestion and subsequent using of digested biomass as organic fertilizer. There is justified necessity of sewage water measuring and facilities are developer for measuring. There is justified reasonability of using screw pumps for sewage water and sludge pumping and the construction of a screw pump of high efficiency.

Based on the new strategy of sewerage, which allows promoting the degree of sewage water purification, getting renewable energy sources is possible for partial or complete providing of necessities of enterprise in thermal and electric energy. In the case of having surplus of renewable energy sources, it is possible to sell them. It allows obtaining safe organic fertilizer, carbon dioxide and it allows decreasing discharge of carbon dioxide in atmosphere.

Keywords: *biogas, biofuel, ecological safety, sewage sludge, technological foundations, improvement of technological processes, sewerage.*