

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

КОСТИК СЕРГІЙ ІГОРОВИЧ

УДК 532.517, 663.1, 66.974

**ТЕПЛООБМІН І ГІДРОДИНАМІКА ПРИ КОНЦЕНТРУВАННІ РОЗЧИНІВ
МЕТАНОГЕНІВ В РОТОРНО-ДИСКОВОМУ АПАРАТІ**

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2014

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник: доктор технічних наук

Ободович Олександр Миколайович,
Інститут технічної теплофізики НАН України,
старший науковий співробітник,
головний науковий співробітник відділу
тепломасообміну в дисперсних системах.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук

Драганов Борис Харлампійович
Національний університет біоресурсів і
природокористування
професор кафедри теплоенергетики

кандидат технічних наук

Зубрій Олег Григорович
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
доцент кафедри машин і апаратів хімічних та
нафтопереробних виробництв

Захист відбудеться 3 грудня 2014 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01 при Інституті технічної теплофізики Національної академії наук за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту технічної теплофізики НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розісланий 28 жовтня 2014 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.224.01,
кандидат технічних наук



О.І. Чайка

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи.

Зменшення споживання природного газу і заміщення традиційного палива відновлювальними джерелами енергії – це актуальні задачі, які стоять перед народним господарством України. Основними складовими відновлювального потенціалу в країні є відходи тваринницьких ферм, сільського господарства, харчової промисловості та інші. Одним з шляхів використання відходів є технологія анаеробного метанового зброджування. Така технологія дозволяє отримувати високоякісне газове пальне в результаті переробки фактично будь яких органічних відходів тваринництва та рослинництва. Процес метанового зброджування відбувається шляхом розщеплення біомаси мікроорганізмами (метаногенами) в анаеробних умовах. Потенціал одержання біогазу в Україні із відходів рослинництва та тваринництва складає приблизно 2,5 млрд. м³ на рік. АПК України, виробляючи значні обсяги органічних відходів, володіє ресурсами для виробництва біогазу, здатними замінити 1,5 млрд. м³ газу на рік. При розвитку галузі і широкому використанні рослинної сировини цей потенціал може бути доведений до 18 млрд. м³ у перерахунку на природний газ.

На сьогоднішній день інтенсифікація та оптимізація технології переробки органічних відходів тваринництва за допомогою біогазової технології, є актуальним завданням для світового агропромислового комплексу. З цієї причини необхідно розробляти нові інноваційні методи, які сприяли б інтенсифікації ресурсо-енергозберігаючих технологій і зменшували капітальні витрати. Біогазова технологія також володіє певними недоліками, які пов'язані із значним терміном окупності, великими капітальними витратами, неможливістю досконало керувати технологічним процесом. Тому виникає необхідність пошуку шляхів оптимізації та інтенсифікації процесу метанового зброджування.

Поліпшення показників даної технології може бути досягнуто шляхом отримання концентратів метаноутворюючих мікроорганізмів, які можливо вносити в біореактор в пусковий період, а також у період безпосереднього метаноутворення, тобто внесення відповідних груп мікроорганізмів, які більш ефективно розщеплюють субстрат на відповідних стадіях (при стадії гідролізу і стадії безпосереднього анаеробного розщеплення). Таким чином штучне збільшення концентрації метаногенів в біореакторі дозволить: зменшити період протікання процесу; зменшити капітальні витрати на процес метанового зброджування, в наслідок чого можливо досягти зменшення площі і обсягів біогазових установок; можливість контролю та управління ферментаційним процесом, частково збільшити вихід біогазу з одиниці субстрату.

Однак концентрування анаеробних мікробіологічних препаратів (метаногенів) є складним завданням, оскільки в якості теплоносія неможливо використовувати повітря, так як воно містить кисень, який є згубним для даного типу мікроорганізмів, а також необхідно вести процес в термолабільних умовах, тобто тоді, коли температура розчину, що концентрується, не перевищує температуру мокрого термометра. Також слід зазначити, що на вихід життєздатних клітин в готовому концентраті впливають напруження зсуву, руйнуючи мембранну оболонку клітини. Тобто необхідне створення такого тепломасообмінного обладнання, яке б забезпечувало проходження процесу концентрування в термолабільних, анаеробних умовах і з мінімальними напруженнями зсуву.

Аналіз науково - технічної інформації свідчить про дослідження процесів зневоднення за допомогою ліофільних, конвективних та розпилювальних способів сушки мікробіологічних препаратів, однак слід зазначити, що для зневоднення

анаеробних мікроорганізмів метаногенів можливо використовувати, тільки спосіб із застосуванням ліофілізації, так як даний тип мікроорганізмів дуже чутливий до перепадів температур, вмісту кисню в теплоносії та до напружень зсуву. Однак ліофільна сушка потребує значних капітальних затрат на одиницю готової продукції. Також варто звернути увагу, що число робіт присвячених концентруванню метаногенів в анаеробних, термолабільних умовах, фактично відсутня. У зв'язку з цим постає необхідність у дослідженні процесу зневоднення таких мікробіологічних препаратів та створенні нового обладнання та теплотехнологій, які дозволять надалі використовувати їх для інтенсифікації біогазової технології переробки органічних відходів.

Нами запропонована технологія і устаткування для зневоднення культуральних середовищ метаногенів в анаеробних, термолабільних умовах при мінімальних напруженнях зсуву.

Зв'язок з постановами, програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, які проведено у відповідності з планами науково-дослідних робіт: «Дослідження тепломасообміну при формуванні нових композиційних гранульованих палив з твердих відходів агропромислових підприємств», (2011 р. номер державної реєстрації - 0109U002561), «Дослідження процесів тепломасопереносу та розробка технології утилізації вологих відходів тваринництва з одержанням твердих гранульованих палив», (2012 р. № - 0110U005361) та «Біомаса як паливна сировина» («Біопаливо»).

Мета роботи полягає в проведенні комплексних досліджень процесу зневоднення (концентрування) термолабільних мікробіологічних матеріалів в анаеробних умовах в роторно-дисковому випарному апараті і розробці на цій основі енергозберігаючої технології та обладнання для виробництва концентратів метаногенів.

Завдання досліджень для досягнення поставленої мети:

- дослідити можливість виготовлення рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації виробництва біогазу;
- теоретично дослідити механізм утворення плівки рідини на дисковій насадці, що обертається в роторно-дисковому випарному апараті;
- теоретично дослідити розподіл температурних полів по поверхні дискової насадки, що обертається в роторно-дисковому випарному апараті;
- теоретично дослідити розподіл напружень зсуву вздовж поверхні дискової насадки, які виникають в наслідок її обертового руху;
- створити експериментальний стенд для зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах;
- теоретично дослідити теплові та енергетичні потоки стендового обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах;
- експериментально визначити напірні, витратні та енергетичні характеристики роторно-дискового випарного апарата;
- відпрацювати оптимальні режими роботи стенда по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах і підготувати технологічну інструкцію одержання концентратів метаногенів;
- розробити апаратурно-технологічну лінію виробництва рідких концентратів метаногенів;
- оцінити енергетичну та економічну ефективність роботи установки для зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах при виробництві концентратів метаногенів.

Об'єкт дослідження - препарати мікробіологічного синтезу (метаногени), роторно-дисковий випарний апарат.

Предмет дослідження – теплообмін, гідродинаміка, напруження зсуву, концентрування метаногенів.

Моделльні середовища – культуральна рідина метаногенів.

Методи дослідження – експериментальні методи з використанням вимірювальних засобів та лабораторного обладнання; статистична обробка даних; методи фізичного та математичного моделювання гідродинаміки та тепломасообміну, які реалізовані за допомогою сучасних комп'ютерних пакетів.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі **вперше** отримані такі наукові результати:

- запропоновано спосіб концентрування термолабільних анаеробних метаногенів в роторно-дисковому випарному апараті, для інтенсифікації і оптимізації роботи біогазової станції;
- теоретично досліджено гідродинаміку процесу утворення плівки рідини, на поверхні дискової насадки роторно-дискового випарного апарата, яка частково занурена в рідину, що концентрується, та обдувається газовим теплоносієм;
- теоретично досліджено теплообмін в роторно-дисковому випарному апараті, а саме розподіл температурних полів по поверхні дискової насадки, у випадку її контакту з гріючим теплоносієм та зануренні в розчин, що концентрується;
- розроблено та вдосконалено конструкцію стендового обладнання по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах;
- досліджено і обрано раціональну конструкцію і оптимальні режими роботи стендового обладнання по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах;
- експериментально встановлено можливість одержання рідких концентратів метаногенів на стендовому обладнанні, основним апаратом якого є роторно-дисковий випарний апарат, в термолабільних анаеробних умовах при мінімальних напруженнях зсуву;
- запропоновано апаратурно-технологічну лінію виробництва рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації роботи біогазової станції.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає у створенні енергозберігаючої інноваційної технології та обладнання по виробництву рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації і оптимізації роботи біогазової станції.

Впровадження результатів на етапі проектування дослідних зразків виробів при побудові математичних моделей гідродинаміки утворення пограничного шару плівки рідини, що концентрується та моделей розподілу полів температур в роторних плівкових випарних апаратах при зневодненні термолабільних рідин - ТОВ «Консультаційне науково-виробниче підприємство «ЙОД».

Впровадження універсального сушильного стенда по зневодненню термолабільних матеріалів в навчальний процес при підготовці студентів кафедри біотехніки та інженерії Національного технічного університету України «КП».

Особистий внесок здобувача в опублікованих разом із співавторами наукових роботах полягає в постановці завдання, формулюванні вихідних даних і крайових умов та їх обробці за допомогою сучасних комп'ютерних пакетів; у створенні експериментального дослідно-промислового стенду по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах; розробці методик експериментальних досліджень та статистичній обробці отриманих результатів;

зіставленні отриманих експериментальних результатів з теоретичними даними; узагальненні результатів і видачі рекомендацій; участі у розробленні технології та апаратурного оснащення; у впровадженні та патентуванні розробок; підготовці до публікації результатів досліджень.

Достовірність результатів забезпечується коректністю, повнотою та адекватністю фізичних припущень в постановці задач, застосуванням сучасних засобів вимірювального комплексу, а також методів статистичної обробки експериментальних даних та підтверджується задовільною відповідністю при зіставленні результатів розрахунків з отриманими експериментальними даними.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та матеріали дисертаційної роботи були представлені 8-ми тезами доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях: «Проблеми промислової теплотехніки» (м. Київ, 2013); міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» (м. Київ, 2011, 2012, 2013); всеукраїнська науково-практична конференція «Біотехнологія 21 століття» (м. Київ, 2014); міжнародна науково-практична конференція «MODERNÍ VÝMOŽENOSTI VĚDY» (м. Прага, 2014); міжнародна науково-практична конференція «Modern European science» (м. Шеффілд, 2014); міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2014); на наукових семінарах ІТТФ НАН України.

Публікації. Зміст дисертаційної роботи відображено в 19 наукових працях: у тому числі у 9 статтях у фахових наукових виданнях, 1 з яких входить в міжнародну наукометричну базу Index Copernicus у 8 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських конференціях, в 1 деклараційному патенті на винахід, в 1 деклараційному патенті на корисну модель.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків; викладена на 150 сторінках основного тексту, на 15 сторінках додатків; містить 53 рисунки та 9 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано наукову та практичну актуальність дисертаційної роботи; визначено зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету роботи та конкретні задачі досліджень для її досягнення; наведено загальну характеристику роботи, наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, вказано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів дисертації.

У **першому розділі** проведено аналіз літературних джерел з дослідження основних методів інтенсифікації тепломасообміну в біогазових станціях. Обґрунтовано основні мікробіологічні і біохімічні процеси в біореакторі та оптимальна концентрація клітин метаногенів при переробці органіки. Проведено аналіз літературних джерел з дослідженням процесу зневоднення (концентрування) термолабільних мікробіологічних матеріалів, проаналізовано основні способи та обладнання для зневоднення термолабільних мікробіологічних матеріалів.

Відповідно до літературних даних та аналізу публікацій звичайна концентрація метаноутворюючих бактерій лежить в межах $10 - 10^3$ клітин/мл, при цьому для інтенсивного та оптимального проходження процесу необхідна концентрація $10^5 - 10^7$ клітин/мл.

Виявлено, що більшість мікробіологічних препаратів, що підлягають процесу зневоднення, являють собою суспензії, дисперсне середовище яких у свою чергу є

розчинами органічних і неорганічних сполук. У самій мікробній клітині знаходиться майже 80 - 85 % води, при цьому частина води знаходиться у вільному стані, частина у зв'язному. Зменшення кількості води в клітині тягне глибокі зміни у всій колоїдній системі. Білкові речовини - основні елементи мікробної клітини, тому значна втрата води призводить до денатурації білка, що є незворотнім процесом втрати життєдіяльності.

Залежно від способу переведення живої клітини в стан анабіозу відрізняють анабіоз при заморожуванні, або холодний анабіоз, і анабіоз при сушінні, або сухий анабіоз. У наших дослідах розглядається стан клітини біомаси, яка зневоднюється без застосування холоду.

Порівнюючи різні методи зневоднення живої клітинної біомаси мікроорганізмів і аналізуючи причини інактивації клітин мікроорганізмів при зневодненні і механізм переміщення вологи в клітинах, зробимо оцінку застосування способу зневоднення.

- Ліофільна сушка - з меншим ступенем інактивує ферменти, добре зберігає життєздатність клітин, але при ліофільній сушці на структури клітини діють деякі негативні фактори (частина клітин гине при заморожуванні, так як кристалики льоду утворюються при різкому охолодженні можуть пошкоджувати мембрану клітини), також цей тип зневоднення досить енерговитратний.

- Розпилювальна сушка - процес зневоднення йде швидко, тому на життєдіяльність істотно не впливають ні ферментативні процеси, ні підвищення концентрації електролітів, але можливі випадки пересушування поверхні частинок і перегрів висушеного матеріалу. Також слід зазначити, що при великих швидкостях на клітину діють так звані напруження зсуву, що призводить до пошкодження її мембрани і відповідно малому відсотку виходу живих клітин.

- Конвективні методи сушіння найчастіше застосовують для зневоднення багатотоннажної мікробної біомаси в промисловості - при виробництві сухих хлібопекарських дріжджів, препаратів молочнокислих бактерій, різних заквасок, біопрепаратів. Даний спосіб зневоднення також досить енерговитратний.

Концентрування анаеробних мікробіологічних препаратів (метаногенів) є складним завданням, оскільки в якості теплоносія неможливо використовувати повітря, так як воно містить кисень, який є згубним для даного типу мікроорганізмів, а також необхідно вести процес в термолабільних умовах, тобто тоді, коли температура розчину, що концентрується, не перевищує температуру мокрого термометра. Слід також зазначити, що для зневоднення метаногенів можливо використовувати, тільки спосіб із застосуванням ліофілізації, так як даний тип мікроорганізмів дуже чутливий до перепадів температур, вмісту кисню в теплоносії та до напружень зсуву.

Нами запропонована технологія і устаткування для зневоднення культуральних середовищ метаногенів в анаеробних, термолабільних умовах при мінімальних напруженнях зсуву.

Штучне збільшення концентрації метаногенів в базовому об'ємі біореактора дозволить:

- оптимізувати та інтенсифікувати роботу біогазової станції;
- зменшити капітальні затрати на процес метанового зброджування;
- зменшити площі та об'єми біогазових станцій;
- зменшити період протікання процесу;
- збільшити вихід біогазу;
- контролювати та керувати ферментаційним процесом.

Другий розділ роботи присвячений математичному моделюванню гідродинаміки процесу утворення плівки рідини, на поверхні дискової насадки роторно-дискового випарного апарата, яка частково занурена в рідину, що концентрується, та обдувається газовим теплоносієм; математичному моделюванню теплообміну в роторно-дисковому випарному апараті, а саме розподіл температурних полів по поверхні дискової насадки, у випадку її контакту з гріючим теплоносієм та зануренні в розчин, що концентрується; моделюванню розподілу напружень зсуву по поверхні дискової насадки; розрахункам теплових та енергетичних потоків роторно-дискового плівкового випарного апарата.

Гідродинамічна задача. Процес зневоднення термолабільних матеріалів таких як метаногени, можливо здійснити в роторно-дисковому плівковому випарному апараті (РДПВА). РДПВА на валу має ряд дискових насадок, які частково занурені в культуральний розчин і приводяться приводом в обертальний рух (рис. 1.) Була поставлена завдання визначення товщини наростаючого пограничного шару поблизу поверхні диска, що обертається за допомогою математичного моделювання, що дасть можливість визначення оптимальних робочих параметрів (габаритні розміри диска, швидкість обертання, температура газового теплоносія і т.д.) для реального апарату. На поверхні плоского диска, що обертається, який частково занурений в культуральну рідину, утворюється тонка рідинна плівка, яка обдувається теплим газовим теплоносієм при виході диска з рідини. З поверхні плівки в теплоносії випаровується волога, при цьому температура розчину, що концентрується не перевищує температуру мокрого термометра. Концентрація розчиненої речовини в рідині підвищується, процес триває до досягнення заданої концентрації.

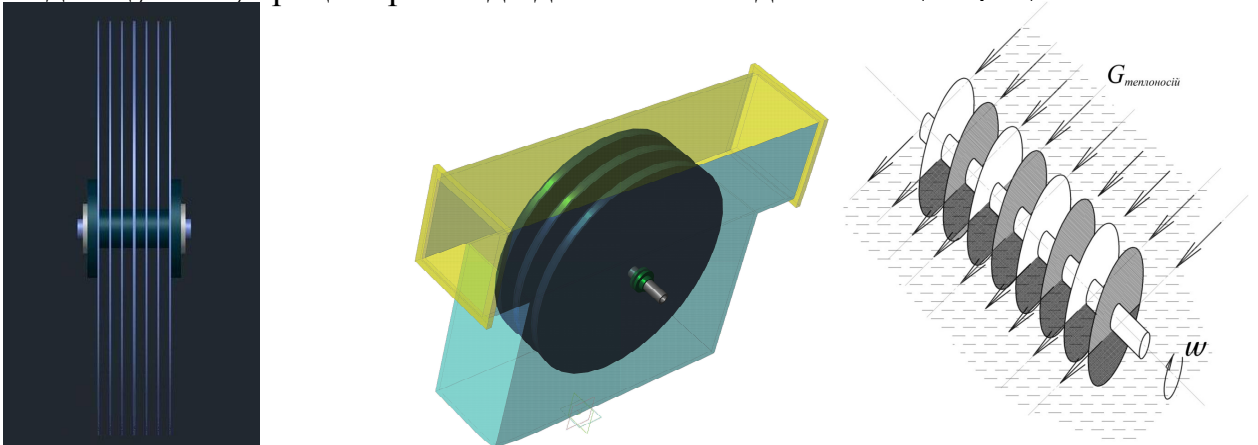


Рис. 1. 3D модель роторно-дискового плівкового випарного апарата.

На процес випаровування вологи з плівки рідини впливає декілька факторів, у тому числі товщина плівки, яка в свою чергу визначається швидкістю обертання диска, фізичними властивостями рідини, габаритними розмірами диска. Для оцінки впливу різних факторів на товщину плівки рідини складаємо математичну модель процесу течії рідини поблизу поверхні частково зануреного диска. Враховуючи геометричну форму диска вибираємо циліндричну систему координат (рис.2 , а). Початок координат поміщаємо на перетин осі обертання з площиною диска. В умовах випаровування води з поверхні плівки, можна припустити, що тепла енергія підводиться до не зануреної частини диска і повністю витрачається на випаровування, при цьому температура розчину залишається постійною, тобто процес течії рідини поблизу поверхні диска відбувається в ізотермічних умовах.

Таким чином математична модель складається з рівнянь Нав'є-Стокса і рівняння нерозривності, система рівнянь (1).

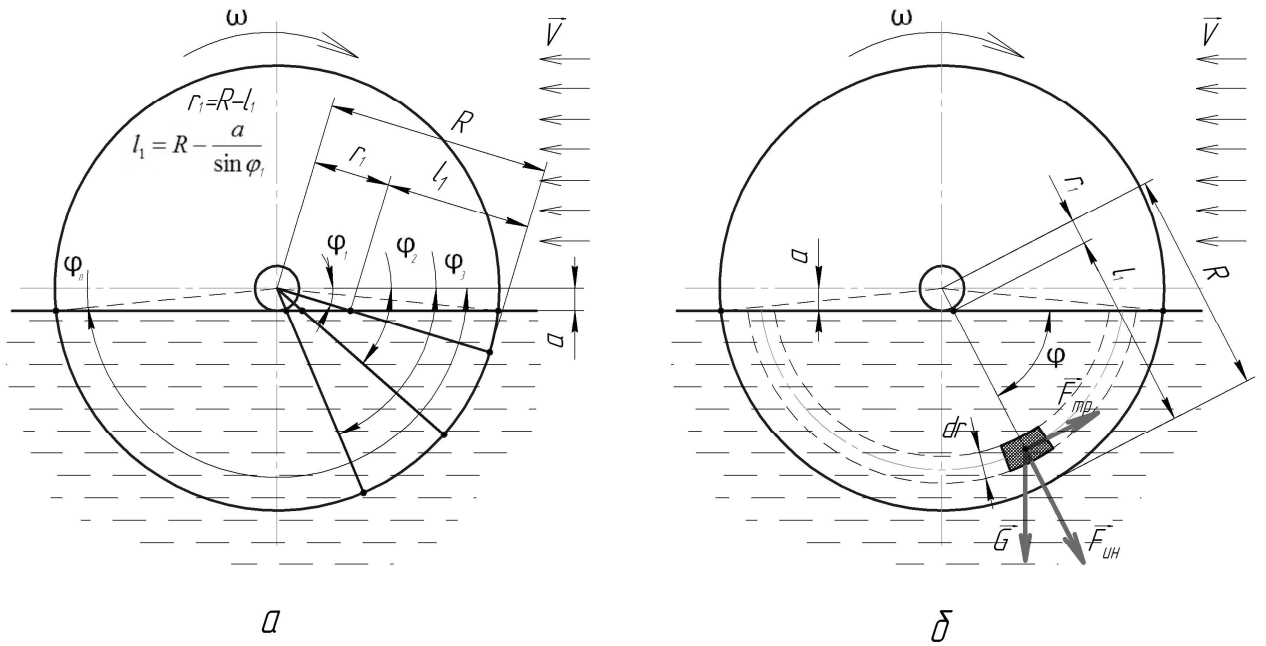


Рис 2. Розрахункова схема обертового диска в потоці теплоносія.
 а - основні геометричні розміри елементів диска; б - дія сил інерції F_{in} , тертя F_{mp} і тяжіння G на шар рідини шириною dr .

При сталому режимі роботи обладнання процес течії плівки рідини поблизу поверхні диска визначається дією сил тяжіння, інерції і тертя. В умовах ламінарного руху рідини, швидкість у напрямку осі Z практично відсутня (рис. 2, б).

Запишемо математичну модель процесу з урахуванням прийнятих припущень:

$$\begin{cases} \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \\ \rho \left(W_r \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} - \frac{W_\varphi^2}{r} \right) = \rho g_r + \mu \left(\frac{\partial^2 W_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W_r}{\partial \varphi^2} - \frac{W_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 W_r}{\partial z^2} \right) \\ \rho \left(W_r \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{W_\varphi}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{W_r \cdot W_\varphi}{r} \right) = \rho g_\varphi + \mu \left(\frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial W_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial \varphi^2} - \frac{W_\varphi}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial W_r}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial z^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови:

$$z = 0; \quad W_r = 0; \quad W_\varphi = \omega \cdot r; \quad (2)$$

$$z = \delta; \quad W_r = 0; \quad W_\varphi = 0. \quad (3)$$

Для визначення складової швидкості W_r в пограничному шарі рідини поблизу обертового диска, розглянемо рівновагу елементарного об'єму рідини в прикордонному шарі. Складемо рівняння рівноваги в проекції на вісь r . Виділимо шар рідини шириною dr , на шар діють сили інерції F_{in} , тертя F_{mp} і тяжіння G (рис. 2, б).

Запишемо рівняння для цих сил:

$$F_{in} = \pi \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \delta \cdot r^2 \cdot dr; \quad (4)$$

$$G = \pi \cdot \rho \cdot g \cdot \delta \cdot r \cdot dr; \quad (5)$$

$$F_{mp} = \pi \cdot r \cdot \mu \cdot \frac{dW_r}{dz} \cdot dr. \quad (6)$$

Рівняння рівноваги в проекції на вісь r :

$$\pi \cdot \rho \cdot \omega^2 \cdot \delta \cdot r^2 \cdot dr + \pi \cdot \rho \cdot g \cdot \delta \cdot r \cdot dr = \pi \cdot r \cdot \mu \cdot \frac{dW_r}{dz} \cdot dr. \quad (7)$$

З рівняння рівноваги визначимо градієнт швидкості:

$$\frac{dW_r}{dz} = \frac{\rho}{\mu} \delta (\omega^2 r + g). \quad (8)$$

Після інтегрування (8) отримаємо:

$$W_r = \int_0^\delta \frac{\rho}{\mu} \delta (\omega^2 r + g) dz; \quad (9)$$

$$W_r = \frac{(\omega^2 r + g) \cdot \delta^2}{2\nu}. \quad (10)$$

Для визначення складової швидкості W_φ , задамося функцією розподілу вздовж осі Z у вигляді полінома:

$$W_\varphi = a + bz + cz^2 + dz^3. \quad (11)$$

де a, b, c, d - постійні коефіцієнти інтегрування, для визначення яких, скористаємося граничними умовами:

$$z = 0; \quad W_\varphi = \omega \cdot r. \quad (12)$$

Враховуючи, що на зовнішній границі пограничного шару рідини швидкість W_φ асимптотично наближається до нуля, при:

$$z = \delta; \quad W_\varphi = 0; \quad \frac{\partial W_\varphi}{\partial \varphi} = 0. \quad (13)$$

Крім того, на границях $z = 0$ і $z = \delta$ складова швидкості $W_r = 0$, враховуючи дані умови на границі $z = \delta$ з рівняння (1):

$$\frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (14)$$

Диференціюючи рівняння (14) для складової швидкості W_φ по змінній z :

$$\frac{\partial W_\varphi}{\partial z} = b + 2 \cdot c \cdot z + 3 \cdot d \cdot z^2; \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 W_\varphi}{\partial z^2} = 2 \cdot c + 6 \cdot d \cdot z. \quad (16)$$

Підставляючи граничні умови $z = 0$ при в рівняння (11) знаходимо $a = \omega \cdot r$, враховуючи граничні умови (12) і (13) отримаємо:

$$\begin{cases} a = \omega \cdot r; \\ b = \frac{3 \cdot \omega \cdot r}{\delta}; \\ c = -\frac{3 \cdot \omega \cdot r}{\delta^2}; \\ d = \frac{\omega \cdot r}{\delta^3}. \end{cases} \quad (17)$$

Підставивши значення постійних a, b, c, d в рівняння (11) отримаємо:

$$W_\varphi = \omega \cdot r \cdot \left(1 + 3 \frac{z}{\delta} - 3 \frac{z^2}{\delta^2} + \frac{z^3}{\delta^3} \right). \quad (18)$$

Похідна складової швидкості W_φ по змінній z :

$$\frac{\partial W_\varphi}{\partial z} = 3 \frac{\omega \cdot r}{\delta^3} (\delta^2 - 2 \cdot \delta \cdot z + z^2); \quad (19)$$

$$\text{при } z = 0 \Rightarrow \frac{\partial W_\varphi}{\partial z} = \frac{3 \cdot \omega \cdot r}{\delta}. \quad (20)$$

Масова витрата рідини в пограничному шарі поблизу диска в напрямку осі φ :

$$G_\varphi = \rho \cdot l_1 \cdot \int_0^\delta W_\varphi dz, \quad (21)$$

де: $l_1 = R - \frac{a}{\sin \varphi}$ - довжина зануреної в рідину частини диска, в перетині з координатою φ .

a - відстань від осі обертання диска до поверхні рідини (a дорівнює радіусу вала, на який насаджений диск).

Зміна масової витрати рідини в прикордонному шарі поблизу диска вздовж осі φ по довжині дуги:

$$dl_2 = r \cdot d\varphi; \quad (22)$$

$$\Delta G_\varphi = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \int_0^\delta W_\varphi \cdot dz \right) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (23)$$

Зміна кількості руху рідини в пограничному шарі поблизу диска вздовж осі φ :

$$\Delta L_1 = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \int_0^\delta W_\varphi^2 \cdot dz \right) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (24)$$

За рахунок руху рідини вздовж осі r під дією сил інерції і тяжіння, частина рідини витікає в напрямку осі r , тоді:

$$\Delta L_2 = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \int_0^\delta W_r \cdot W_\varphi \cdot dz \right) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (25)$$

Підставивши вирази для складових швидкості W_φ і W_r , визначаємо зміну кількості руху по рівняннях (24) і (25):

$$\Delta L_1 = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \int_0^\delta \omega^2 \cdot r^2 \left(1 + 3 \frac{z}{\delta} - 3 \frac{z^2}{\delta^2} + \frac{z^3}{\delta^3} \right)^2 dz \right) \cdot r \cdot d\varphi = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{22}{7} \delta \right) \cdot r \cdot d\varphi, \quad (26)$$

$$\Delta L_2 = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \int_0^\delta W_r \cdot \omega \cdot r \left(1 + 3 \frac{z}{\delta} - 3 \frac{z^2}{\delta^2} + \frac{z^3}{\delta^3} \right)^2 dz \right) \cdot r \cdot d\varphi = \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot W_r \cdot \frac{7 \cdot \omega \cdot r}{4} \delta \right) \cdot r \cdot d\varphi. \quad (27)$$

Дотичне напруження на поверхні диска визначаємо з виразу:

$$\tau_w = \mu \frac{dW_\varphi}{dz}. \quad (28)$$

З урахуванням виразу (20) отримаємо:

$$\tau_w = \mu \frac{3 \cdot \omega \cdot r}{\delta}. \quad (29)$$

Інтегральне співвідношення прикордонного шару запишемо у вигляді:

$$\rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{22}{7} \delta \right) \cdot r d\varphi - \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot W_r \cdot \frac{7 \cdot \omega \cdot r}{4} \delta \right) \cdot r d\varphi = -\tau_w \cdot l_1 \cdot r d\varphi. \quad (30)$$

Помноживши обидві частини рівняння (30) на $\frac{1}{rd\varphi}$, отримаємо:

$$\rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \frac{22}{7} \delta \right) - \rho \frac{d}{d\varphi} \left(l_1 \cdot W_r \cdot \frac{7 \cdot \omega \cdot r}{4} \delta \right) = -\tau_w \cdot l_1. \quad (31)$$

З урахуванням залежностей l_1 і δ від φ після диференціювання і ввівши позначення:

$$A = \frac{7}{4} \frac{(\omega^2 \cdot r + g) \cdot \omega \cdot r}{2 \cdot v}; B = \frac{22 \cdot \omega^2 \cdot r^2}{7};$$

$$\left(A \cdot \delta^3 - B \cdot \delta \right) \frac{a \cdot \cos \varphi}{\sin^2 \varphi} + \left(R - \frac{a}{\sin \varphi} \right) (B - A \cdot \delta^2) \frac{d\delta}{d\varphi} = \frac{\mu \omega \cdot r}{\rho \delta}. \quad (32)$$

Вирішимо рівняння (32) відносно похідної $\frac{d\delta}{d\varphi}$:

$$\frac{d\delta}{d\varphi} = \frac{-v \cdot \left(R - \frac{a}{\sin \varphi} \right) \omega \cdot r - \delta^2 \cdot (A \cdot \delta^2 - B) \frac{a \cdot \cos \varphi}{\sin^2 \varphi}}{\left(R - \frac{a}{\sin \varphi} \right) (B - A \cdot \delta^2) \cdot \delta} \quad (33)$$

Рівняння (33) диференціальне рівняння інтегруємо за допомогою пакету MathCad 15 і отримуємо рішення в аналітичному вигляді, а саме 4 вирази для визначення δ , 3 з яких не мають фізичного змісту, внаслідок від'ємного знаку перед радикалом δ_2, δ_4 та під радикалом δ_3 . Тому єдиним раціональним рішенням диференціального рівняння (33) є δ_1 :

$$\delta_1 = \sqrt{\frac{B - B \cdot \ln\left(-\frac{a - R \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi}\right) + \sqrt{\left[\ln\left(-\frac{a - R \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi}\right) - 1\right] \cdot \left[B^2 \cdot \ln\left(-\frac{a - R \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi}\right) - B^2 + 4 \cdot A \cdot \varphi \cdot \omega \cdot r \cdot v\right]}}{2 \left[A - A \cdot \ln\left(-\frac{a - R \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi}\right) \right]}} \quad (34)$$

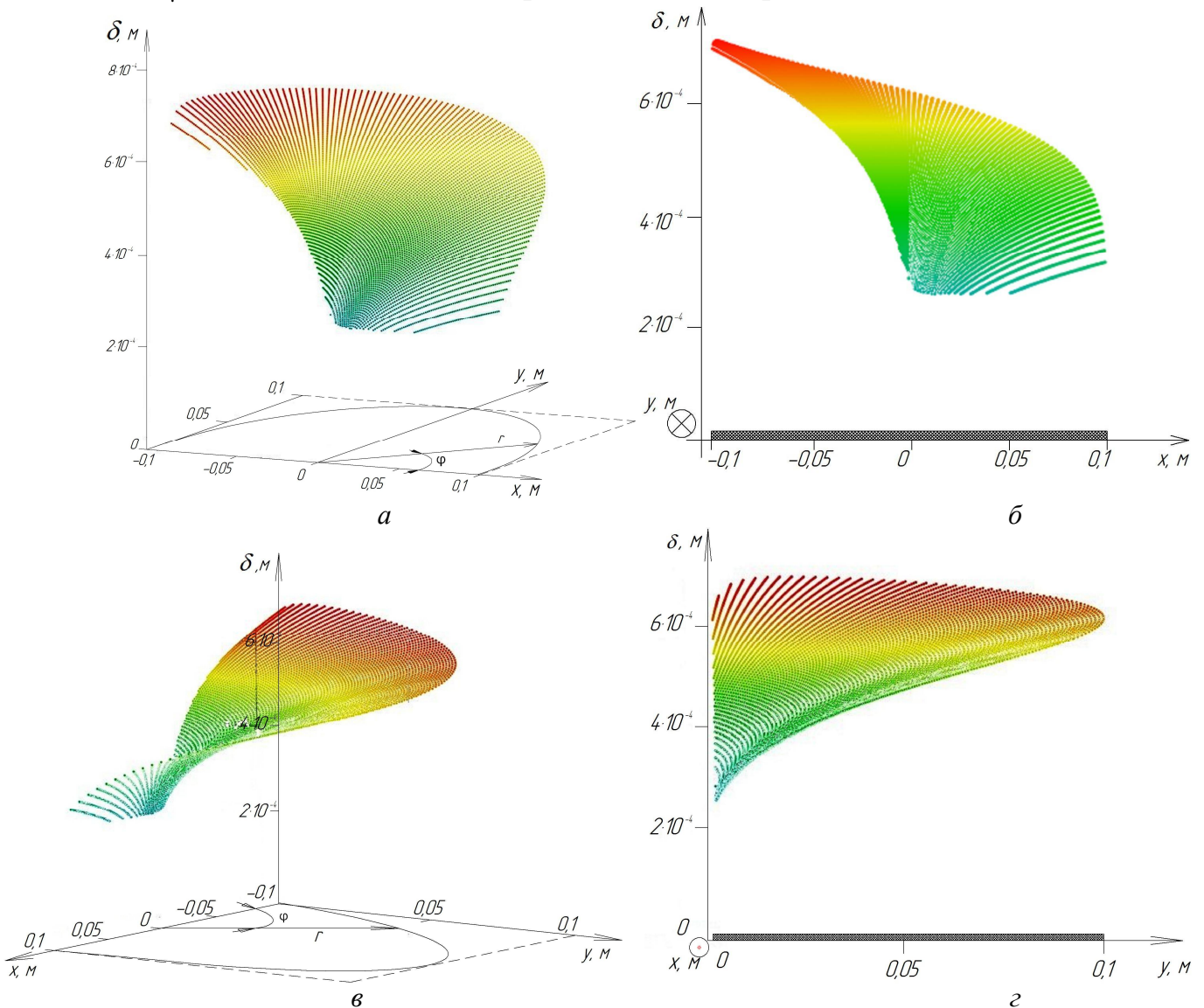


Рис. 3. Графік поверхні пограничного шару, при зануренні диска в культуральну рідину.
 а, в – 3D поверхня у відносних одиницях довжини, б – поверхня в проекції на площину δ -x,
 г – поверхня в проекції на площину δ -y

За допомогою пакета MathCad 15 задавши фізичні параметри рідини, швидкість обертання диска і габаритні розміри ($R = 0,1 \text{ м}$, $a = 0,005 \text{ м}$, $\rho = 1050 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $n = 10 \text{ об/хв}$), отриманий масив значень товщини прикордонного шару рідини поблизу диску, що обертається, за отриманими значеннями побудована поверхня у відносних одиницях довжини (Рис. 3 а, б, в, з).

Аналізуючи масив отриманих значень і поверхню наростаючої плівки, можна відзначити, що в момент входження диска в рідину, він моментально захоплює частину рідини, що відповідає певному значенню товщини δ_1 (Рис. 3 б, з). Причому збільшуючи швидкість обертання і радіус диска, значення стартовою товщини прикордонного шару значно збільшується, це пояснюється фізичними властивостями рідини, а саме високим її поверхневим натягом і тертям між шарами. По мірі подальшого обертання, товщина плівки збільшується з кожним значенням по координаті φ і відповідно по координаті r , а саме зростаючи від центру до периферії (рис. 3 б, в, з), що пояснюється різницею швидкостей обертання точок плівки на диску, а саме її збільшенням від центру до периферії. Товщина плівки культуральної рідини згідно реальним початковим даним математичної моделі лежить в межах від $2,628 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ до $7,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}$.

Теплова задача. Було поставлено завдання визначити розподіл температурних полів по поверхні диска за допомогою математичного моделювання, що дасть можливість визначення оптимальних робочих параметрів (габаритні розміри диска, швидкість обертання, температура газового теплоносія і т.д.) для реального апарата.

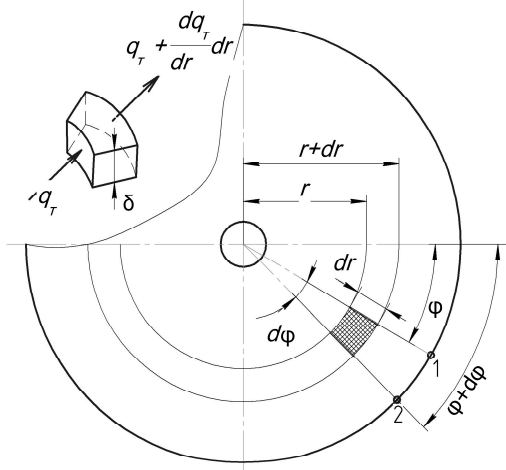


Рис. 4. Розрахункова схема обертового диска зануреного в розчин, що концентрується (теплова задача).

Враховуючи геометричну форму диска вибираємо циліндричну систему координат. Початок координат поміщаємо на перетин осі обертання з площиною диска.

Нагрів відбувається по валу і частині сегменту, тепло розповсюджується від центра диска до периферії, зміна температури по поверхні диска, який занурюється в рідину можна записати у вигляді теплового балансу для елементарного об'єму з розмірами $d\varphi$, dr і δ (рис. 4):

$$\Delta Q_{\text{вн}} = \Delta Q_m + \Delta Q_{\kappa}; \quad (35)$$

Зміна теплоти, яка передається теплопровідністю в елементарному об'ємі dv :

$$\begin{aligned} \Delta Q_m &= q_m \cdot \delta \cdot r \cdot d\varphi - \left(q_m + \frac{\partial q_m}{\partial r} dr \right) \cdot (r + dr) \cdot r \cdot d\varphi = -q_m \cdot \delta \cdot r \cdot d\varphi - \left(\frac{\partial q_m}{\partial r} dr \right) \cdot \delta \cdot r \cdot d\varphi = \\ &= \lambda \frac{\partial t}{\partial r} dr \cdot \delta \cdot d\varphi + \lambda \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} dr \cdot \delta \cdot r \cdot d\varphi = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \cdot \delta \cdot r \cdot dr \cdot d\varphi = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \cdot dv; \end{aligned} \quad (36)$$

Зміна теплоти в елементарному об'ємі dv , внаслідок конвективного теплообміну:

$$\Delta Q_{\kappa} = 2 \cdot \alpha \cdot (t - t_c) \cdot df = 2 \frac{\alpha \cdot (t - t_c) \cdot dv}{\delta}; \quad (37)$$

Зміна внутрішньої енергії в елементарному об'ємі dv :

$$\Delta Q_{\text{вн}} = c\rho \left(t + \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \right) dv - c \cdot \rho \cdot t \cdot dv = c \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \cdot dv; \quad (38)$$

Тоді рівняння (35) прийме вид:

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} d\tau \cdot dv = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) dv + 2 \frac{\alpha \cdot (t - t_c)}{\delta} dv; \quad (39)$$

Враховуючи, що $\varphi = \omega t$, переходимо до змінної φ , тоді рівняння приймає вигляд:

$$c \cdot \rho \cdot \omega \frac{\partial t}{\partial \varphi} = \lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + 2 \frac{\alpha \cdot (t - t_c)}{\delta}; \quad (40)$$

Розділимо ліву і праву частини рівняння на $(\rho \cdot c_p \cdot \omega)$, вищенаведене рівняння набуває наступний вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \varphi} = \frac{\lambda}{\omega} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) + 2 \frac{\alpha \cdot (t - t_c)}{\delta \cdot c \cdot \rho \cdot \omega}. \quad (41)$$

Початкові умови:

$$\tau = 0, \quad t = t_H. \quad (42)$$

Граничні умови:

$$r = a, t = t_c, r = R_3, \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \quad (43)$$

Отримане рівняння є диференціальним рівнянням параболічного типу в частинних похідних.

Враховуючи початкові і граничні умови, за допомогою пакету MathCad15 методом кінцевих різниць отримано рішення даного рівняння. Результатом рішення є масив полів температур по поверхні диска в залежності від координати r і координати φ . Використовуючи закон перетворення координат від циліндричних в декартові побудовано поверхню розподілу температур по диску (рис. 5, а, б).

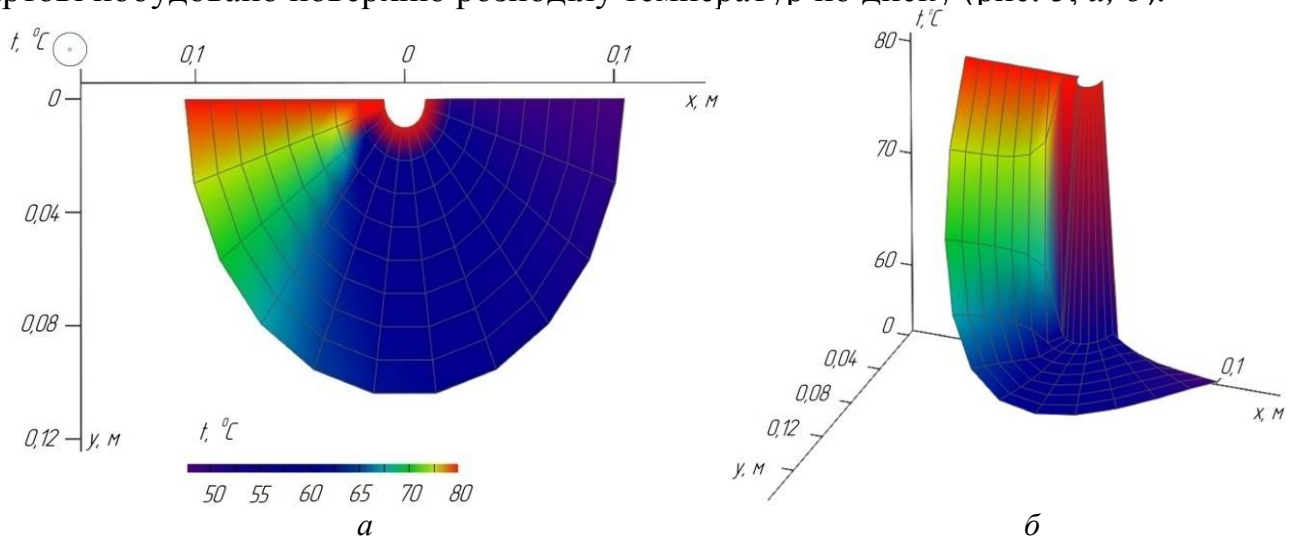


Рис. 5. Градієнт температур по поверхні дискової насадки.
а – поверхня в проекції на площину x - y , б – 3D поверхня температурного поля.

Задача по визначенню напружень зсуву. Було поставлено завдання визначення величини та розподілу напруження зсуву по поверхні дискової насадки внаслідок її обертання, в зв'язку з тим, що дані напруження досягаючи певних значень, можуть пошкоджувати живі клітини, що негативно впливатиме на готовий концентрат. З фізичної точки зору в процесі обертання дискової насадки відбувається захоплення розчину, що концентрується, внаслідок чого

спостерігається ковзання одного шару рідини відносно іншого. Величина зміщення залежить від динамічної в'язкості розчину μ та від швидкості зсуву $\dot{\gamma}$ (рис. 6).

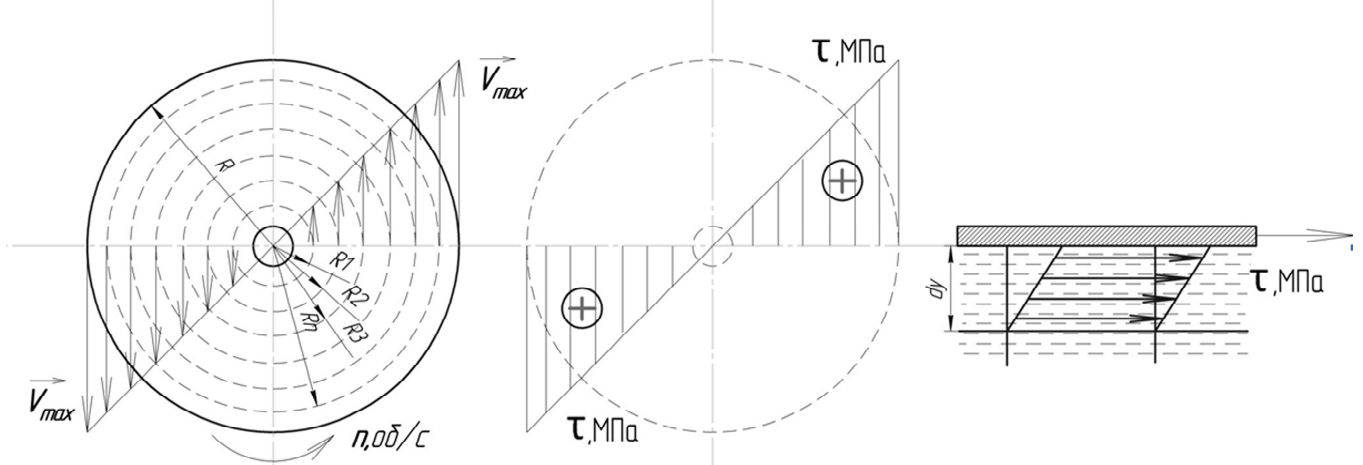


Рис.6. Розрахункова схема для визначення напружень зсуву по поверхні дискової насадки.

Напруження зсуву по поверхні дискової насадки $\tau, [Па]$:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}; \quad (44)$$

Швидкість зсуву вздовж поверхні дискової насадки $\dot{\gamma}, [с^{-1}]$:

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dy}; \quad (45)$$

де dy - товщина пограничного шару рідини по поверхні дискової насадки (відповідно до математичної моделі лежить в межах від $2,628 \cdot 10^{-4} м$ до $7,1 \cdot 10^{-4} м$).

Колова швидкість по поверхні дискової насадки $V_n, [м/с]$:

$$V_n = \omega \cdot R_n. \quad (46)$$

Оскільки швидкість зсуву змінюється по радіусу дискової насадки, було розраховано поле напружень зсуву від різних значень чисел обертів(рис. 7. а, б):

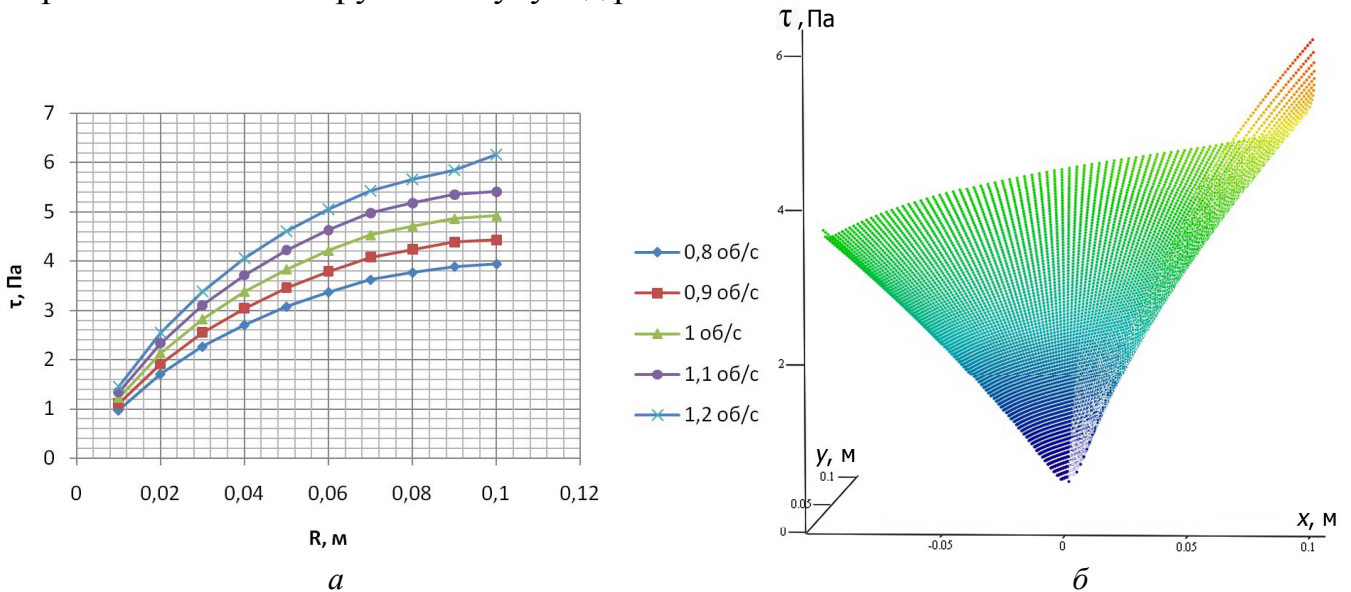


Рис. 7. а - Зміна величини напружень зсуву $\tau, [Па]$ по радіусу дискової насадки, в залежності від числа обертів; б – 3D поверхня напружень зсуву $\tau, [Па]$ по поверхні дискової насадки.

Відповідно літературних даних критичним значенням напружень зсуву від дії перемішуючих пристроїв є $10-50 \text{ Па}$, отже оптимальним діапазоном чисел обертів можна вважати значення до $1,2 \text{ об/с}$. Проведено математичне та комп'ютерне моделювання розподілу температурних полів по поверхні обертової дискової насадки, який частково занурений в культуральну рідину і обдувається газовим теплоносієм.

Отримано масив значень напружень зсуву, які виникають вздовж пограничного шару рідини внаслідок обертання дискової насадки для конкретних габаритних розмірів апарату і фізичних властивостей рідини, що концентрується.

Запропонована математична модель та методика розрахунку напружень зсуву, дозволяє визначати оптимальні робочі параметри промислового роторно-дискового плівкового випарного апарату і може бути використана при проектуванні типового обладнання інших типорозмірів і продуктивності.

Також були проведені теоретичні розрахунки стендового обладнання та визначені основні теплофізичні параметри, такі як:

Кількість теплоти, яка необхідна на концентрування:

$$Q_{\text{вип.в.}} = G_{\text{вип.в.}} \cdot r + G_p \cdot c \cdot \Delta t, \left(\frac{\text{кДж}}{\text{год}} \right) \quad (47)$$

Витрата теплоносія, яка необхідна, щоб підвести тепло на концентрування:

$$G_m = \frac{Q_{\text{вип.в.}}}{C_m \cdot \Delta t_n}, \left(\frac{\text{кг}}{\text{год}} \right) \quad (48)$$

Швидкість руху теплоносія в апараті:

$$W = \frac{G_m}{3600 \cdot F_{\text{ж.н.}} \cdot \gamma}, \left(\frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \quad (49)$$

Проведені розрахунки дали можливість підібрати загальнозаводське обладнання. Також був проведений розрахунок теплових витрат в оточуюче середовище, та встановлена теплоізоляція (спінений поліетилен $\lambda=0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) по системі газопроводів стендового обладнання:

Тепловіддача при вільній конвекції повітря вздовж горизонтальної труби:

$$Nu = 0,54 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (50)$$

Тепловіддача при вимушеній конвекції газу в горизонтальному трубопроводі:

$$Nu = 0,018 \cdot Re^{0,8} \quad (51)$$

Використання теплоізоляційного матеріалу дозволило зменшити витрати теплоти в навколишнє середовище на 15 %.

У третьому розділі представлено: дослідно-промислову установку, методику проведення досліджень та результати дослідження розгінних, теплових та енергетичних характеристик стендового устаткування по зневодненню (концентруванню) термолабільних матеріалів в анаеробних мовах.

ІТТФ НАН України запропонована енергоефективна установка для концентрування термолабільних рідин (Рис. 8), основним апаратом якої є роторно-дисковий плівковий випарний апарат (РДПВА) 3, (рис.1), який дозволяє концентрувати термолабільні матеріали в анаеробних умовах. Пристрій працює наступним чином: в об'єм РДПВА 3, через технологічний штуцер 13 завантажуються рідина, що підлягає концентруванню до певного рівня, встановленого регламентом. У калорифері 1 відбувається підігрів робочого теплоносія (вуглекислий газ CO_2). Вентилятор 5 приводить в рух робочий теплоносії, при цьому відбувається його циркуляція по контуру в об'ємі пристрою.

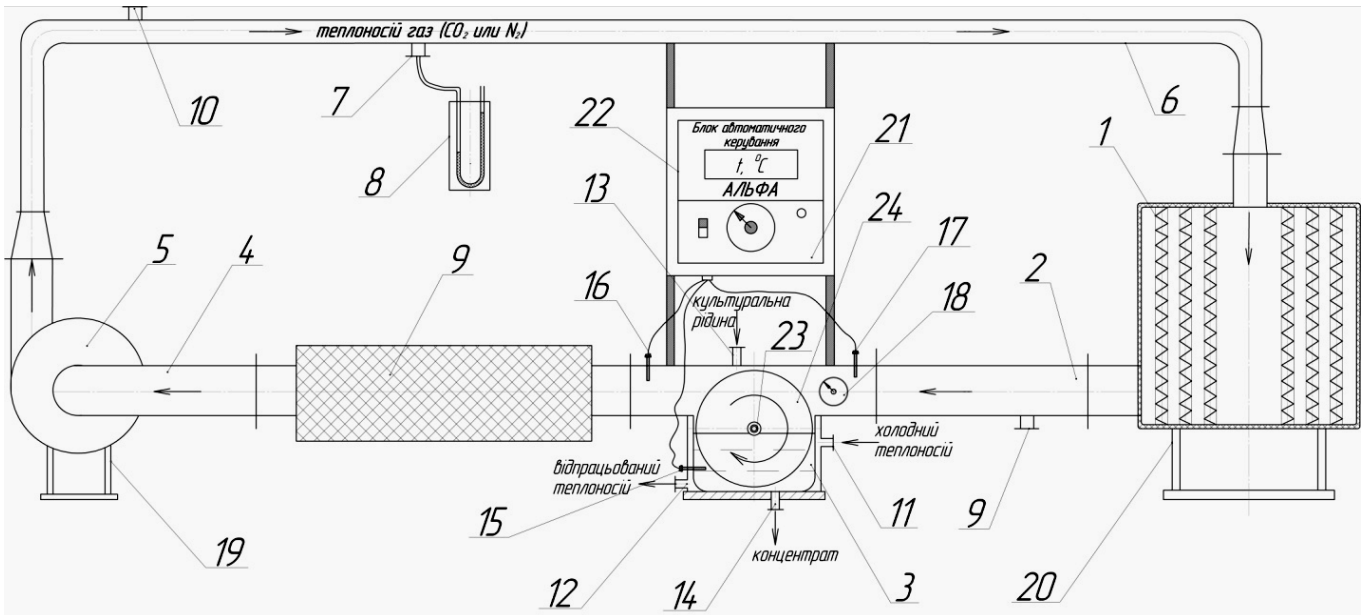


Рис. 8. Схема універсального сушильного стенда для зневоднення термолабільних матеріалів.

Роторно-дисковий плівковий випарний апарат (РДПВА) 3 на валу 23 має ряд дисків 24, частково занурених в культуральний розчин, який зневоднюється. Електропривод 21 РДПВА 3 приводить в обертальний рух диски 24, розташовані на валу 23 і дозволяє змінювати швидкість їх обертання в діапазоні від 0,25 до 5 об/сек. Диски 24 при обертанні на своїй поверхні виносять рідину в зону контакту з теплоносієм, який продувається через об'єм РДПВА 3. Частина вологи випаровується з поверхні дисків 24 і разом з теплоносієм рухається по газопроводу 4 і потрапляє в патрон з силікагелем 9 (рис. 10).

В патроні з силікагелем 9 відбувається поглинання парів вологи, і на виході з патрона в газопровід 4 повертається тільки робочий теплоносіє, рухаючись завдяки напору створюваному вентилятором 5 системою газопроводів 6 знову потрапляє в калорифер 1, в якому відбувається його підігрів до заданої регламентом температури (80°C).

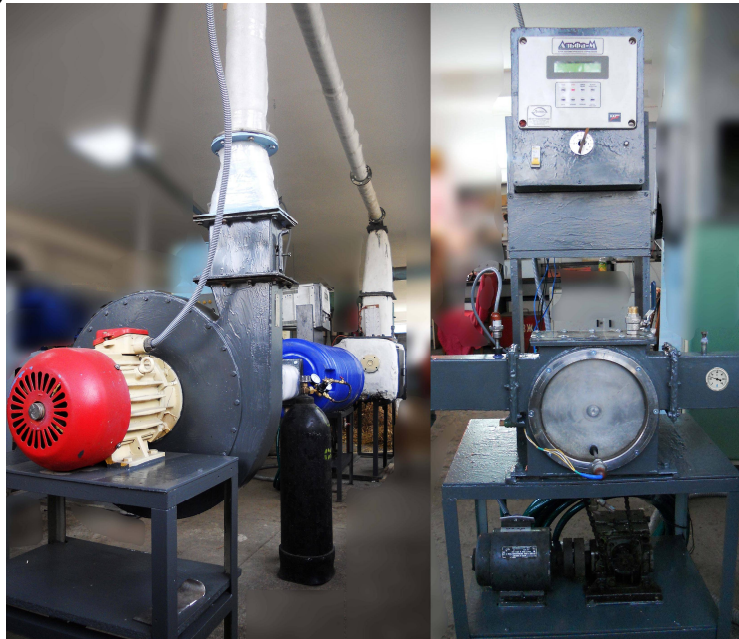


Рис. 9. Зовнішній вигляд універсального сушильного стенда для зневоднення термолабільних матеріалів.

Процес повторюється циклічно. Після завершення процесу, готовий концентрат культуральної рідини через технологічний штуцер 14 зливається з РДПВА 3, після чого його корпус миється і піддається належній обробці для наступного завантаження.

Патрон з силікагелем 9 знімається і просушується, після чого встановлюється назад і пристрій для зневоднення термолабільних рідин знову готовий до використання. Щоб уникнути перегріву рідини, що концентрується, корпус РДПВА 3 оснащений теплообмінної сорочкою, в яку через технологічні штуцери 11 і 12 подається і відводиться охолоджуючий теплоносіє.

Також в корпусі РДПВА 3 встановлені датчики температур (термометри опору ТСМ 50) позиції 15, 16 і 17 за допомогою яких блок автоматичного керування АЛЬФА 22 контролює температурні режими в апараті. Для зміни швидкості потоку теплоносія і його напору (2 кПа), які контролюється анемометром 18 і манометром 8, використовується заслонка вентилятора 5.

В основу досліджень було поставлено завдання визначення оптимальних режимів роботи установки. Для цього були проведені дослідження розгінних характеристик, його продуктивності по випареній волозі і енергетичним витратам.

Аналіз результатів розгінних характеристик універсального сушильного стану по зневодненню термолабільних матеріалів показав, що вихід на робочий режим в установці відбувається при 3-х включених секціях ТЕН за 15 хвилин (рис. 11.1).

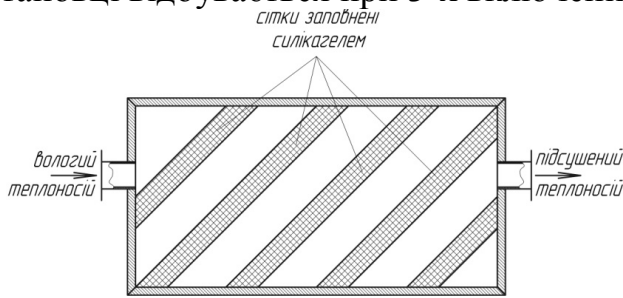


Рис. 10. Схема патрону з силікагелем.

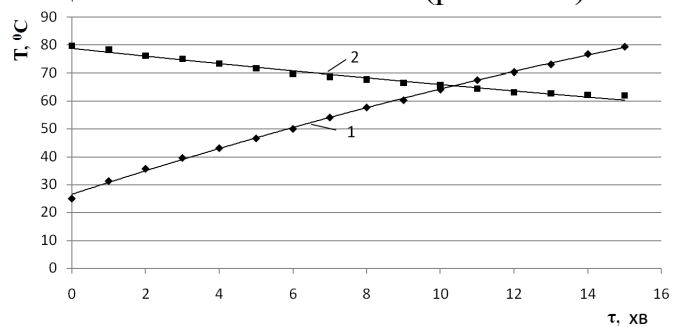


Рис. 11. Розгінні характеристики стану 1 - при пуску стану (1, 2, 3 секція ТЕН працює); 2 - 1 секція ТЕН працює.

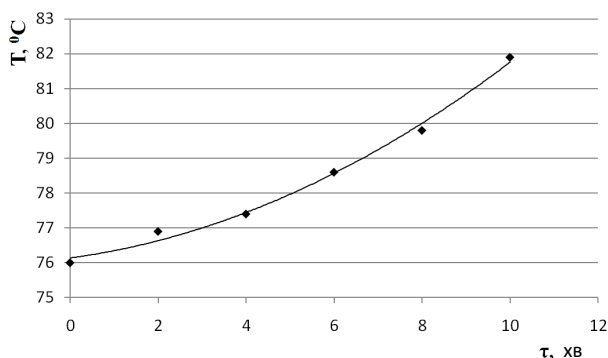


Рис. 12. Розгінні характеристики стану 1, 2 секція ТЕН працює, 3 секція ТЕН відключена.

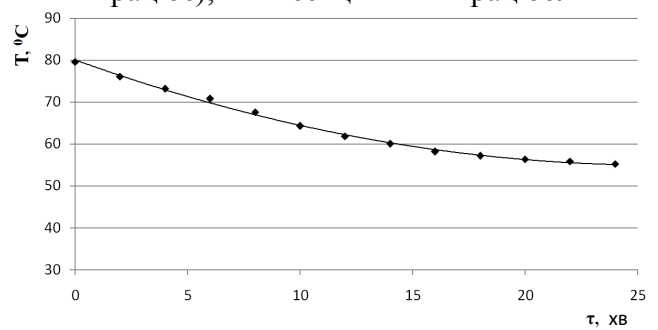


Рис. 13. Розгінні характеристики стану 1, 2, 3 секція ТЕН відключена.

Досліджуючи різноманітні режими роботи установки (рис. 12., рис. 13.), був визначений оптимальний робочий режим, при якому після виходу на режим блок автоматичного управління виконує відключення 2-х секцій ТЕН (рис. 11.2) при цьому температура робочого теплоносія плавно знижується. Через 10 хвилин автоматика включає додаткову секцію ТЕН, яка працює 10 хвилин і вирівнює температуру теплоносія до заданої регламентом. Далі процес повторюється

циклічно. Виходячи з цих даних була побудована діаграма споживаної електричної потужності ТЕН (рис. 14.) та зміни теплоносія (рис. 15.).

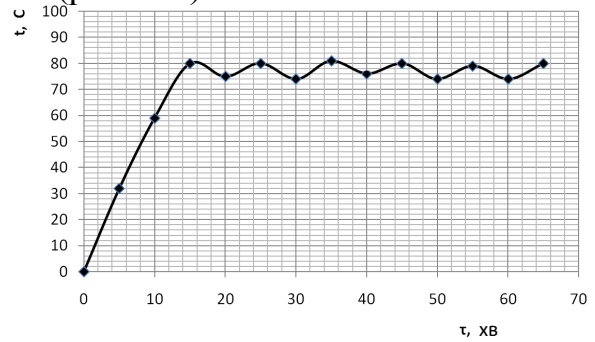
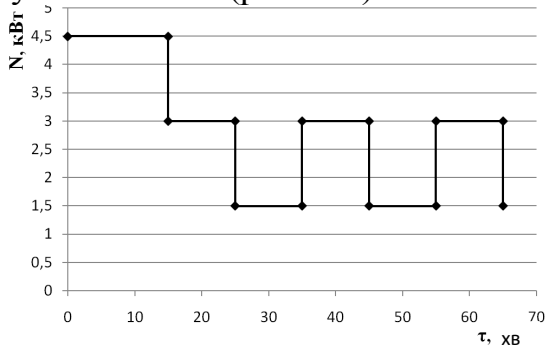


Рис. 14. Зміна потужність N , $кВт$ в часі τ , $хв$, яка витрачається на нагрівання теплоносія.

Рис. 15. Зміна температури теплоносія t , $^{\circ}C$ в часі τ , $хв$.

Потужність універсального сушильного стенда по зневодненню термолабільних матеріалів складається з потужності, яка споживається секціями ТЕН (1,5 $кВт$ кожна секція, при чому середня потужність 3-х секцій складає 2,5 $кВт$, рис.13.), потужності вентилятора (3 $кВт$) і потужності привода РДПВА (0,1 $кВт$).

Швидкість потоку теплоносія по отриманим експериментальним даним, в залежності від положення заслонки ϕ , лежить в межах від 9,3 до 12,5 $м/с$, при цьому об'ємна витрата теплоносія складає від 0,0372 до 0,0484 $м^3/с$ (рис.16).

Проведені дослідження на стенді показали, що при температурі теплоносія $80^{\circ}C$, температура розчину, що концентрується становить $30-35^{\circ}C$ і швидкості потоку теплоносія 10-12 $м/с$, при площі поверхні тепломасообміну 0,44 $м^2$, кількість випареної вологи за одиницю часу складає 1150 $мл/год$ (рис. 17), а кількість затраченої теплової енергії на процес випарювання складає 16200 $кДж$ (3869 $ккал$).

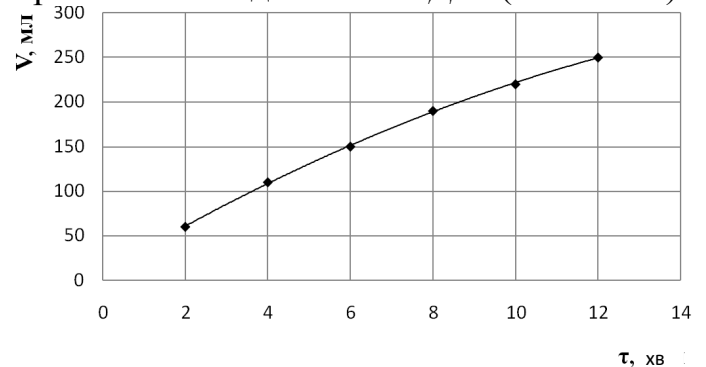
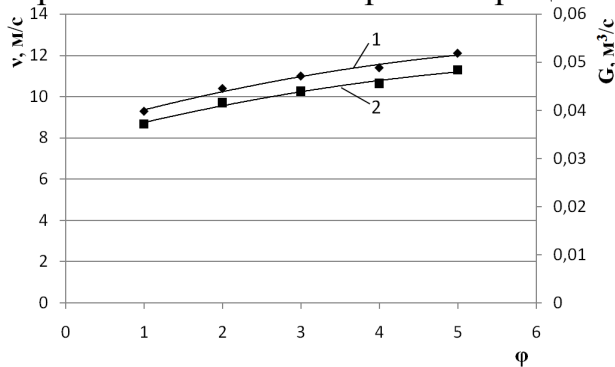


Рис 16. Характеристики потоку теплоносія. 1– швидкість потоку теплоносія в трубопроводі, $м/с$; 2 – витрата теплоносія в трубопроводі, $м^3/с$.

Рис 17. Продуктивність установки по випареній волозі, $мл/хв$.

У четвертому розділі розглянуто результати експериментальних досліджень по зневодненню культуральних розчинів метаногенів.

В основу досліджень було поставлено завдання визначення оптимальних режимів роботи установки. Для цього були проведені дослідження розгінних характеристик, її продуктивності по випареній волозі і енергетичним витратам, при цьому контролювалася фактична виживаємість метаногенів в готовому концентраті.

На експериментальному стенді роторно-дискового плівкового випарного апарату (рис. 9) були проведені дослідження по концентрування (зневоднення) розчинів метаногенів, в залежності від температури і швидкості теплоносія, числа обертів ротора з дисковими насадками. За отриманими даними побудовані графічні залежності (рис. 18, рис.19, рис.20).

Аналізуючи отримані результати необхідно відзначити, що швидкість потоку газового теплоносія суттєво інтенсифікує тепломасообмін, проте підвищення її більш ніж 12 м/с , призводило до зриву прикордонного шару рідини з поверхні диска, з цієї причини оптимальним діапазоном був прийнятий від 9 м/с до 11 м/с (рис. 18). Що стосується залежності кількості випареної вологи культуральної рідини метаногенів від температури теплоносія, то відзначається збільшення швидкості зневоднення з підвищенням температури (рис. 19).

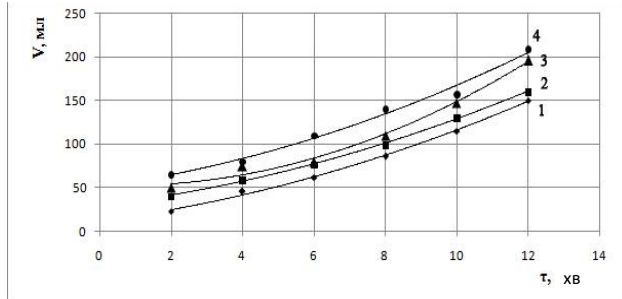


Рис. 18. Залежність кількості випареної вологи культуральної рідини метаногенів V , мл від часу τ , хв при різних швидкостях потоку теплоносія (1 – швидкість потоку 9 м/с ; 2 – швидкість потоку 10 м/с ; 3 – швидкість потоку 11 м/с ; 4 – швидкість потоку 12 м/с)

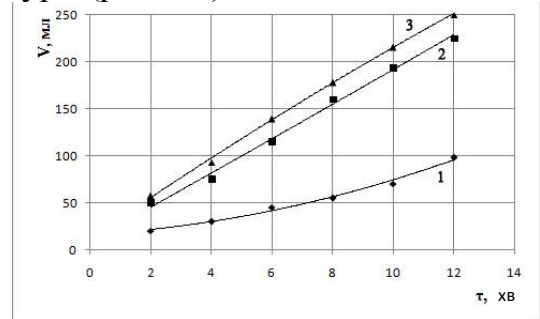


Рис. 19. Залежність кількості випареної вологи культуральної рідини метаногенів V , мл від часу τ , хв при різних температурах теплоносія. (1 – температура теплоносія $60 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – температура теплоносія $80 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 – температура теплоносія $100 \text{ }^\circ\text{C}$)

Цікаві дані були отримані при дослідженні впливу числа обертів ротора з дисковими насадками на швидкість зневоднення, результати показали, що явного збільшення продуктивності по випареній волозі не спостерігається (рис. 20).

Виходячи з вищевикладеного, виникла необхідність визначення якісних показників готового концентрату метаногенів, за якими буде можливо судити про вибір оптимальних параметрів роботи обладнання. Спільно з кафедрою біотехніки та інженерії Національного технічного університету України НТУУ «КПІ» було проведено ряд досліджень готових концентратів культуральних рідин метаногенів.

В основу досліджень було поставлено завдання визначення оптимальних режимів роботи установки, за яких буде досягатися максимальний вихід життєздатних колонієутворюючих мікроорганізмів. Проводилися дослідження виживаності метаногенів в залежності від різних температур теплоносія і швидкості обертання ротора з дисковими насадками, також визначалась оптимальна ступінь концентрування.

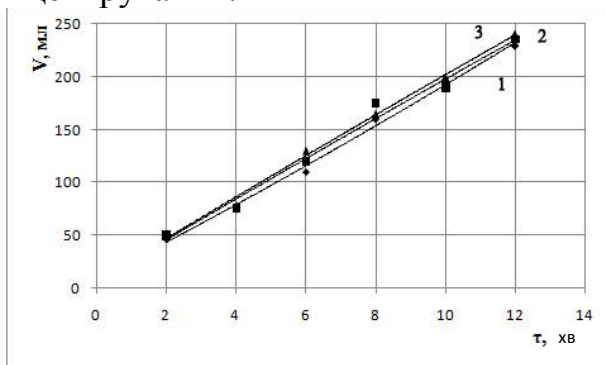


Рис. 20. Залежність кількості випареної вологи культуральної рідини метаногенів V , мл від часу τ , хв при різних числах обертів ротора з дисковими насадками (1 – число обертів $0,2 \text{ об/с}$; 2 – число обертів $0,6 \text{ об/с}$; 3 – число обертів $1,0 \text{ об/с}$)

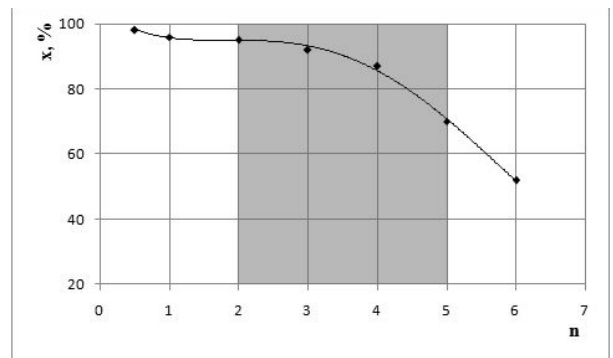


Рис. 21. Виживаність метаногенів x , % в готовому концентраті в залежності від ступеня концентрування n

Контроль виживаності метаногенів проводився мікроскопічним дослідженням з подальшим посівом мікроорганізмів на поживне середовище. За результатами досліджень побудовані графіки залежностей (рис. 21, рис.21, рис. 22).

Аналіз отриманих результатів дає можливість стверджувати, що виживаність метаногенів в значній мірі залежить від ступеня концентрування первинного розчину, так наприклад при концентрування більше ніж у 5 разів, показники виживаності метаногенів в готовому концентраті різко зменшувалися, що дає можливість говорити про оптимальні значення ступеня концентрування 2 - 5 (рис. 21). Що стосується температурних режимів роботи установки, то слід зазначити, що на виживаність метаногенів в готовому продукті температура теплоносія особливого впливу не мала, крім випадку підвищення її вище $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, при якому показники виходу живих клітин різко знижуються через перегрів плівки рідини. Так само слід зазначити, що не доцільно вести процес зневоднення при температурі теплоносія нижче $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, так як процес протікає не виправдано тривалий час. Оптимальний діапазон температур газового теплоносія лежить в межах від 70 до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 22).

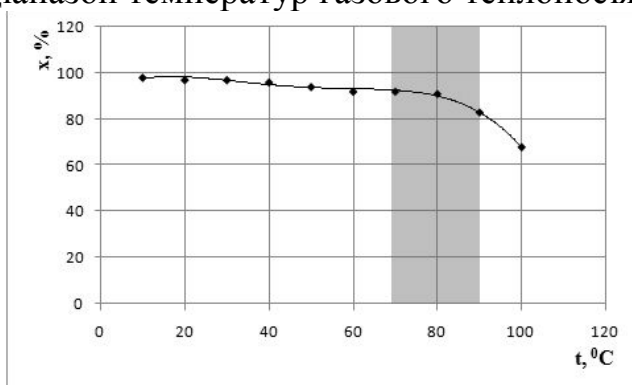


Рис. 22. Вживаність метаногенів $x, \%$ в готовому концентраті в залежності від температури теплоносія $t, ^{\circ}\text{C}$

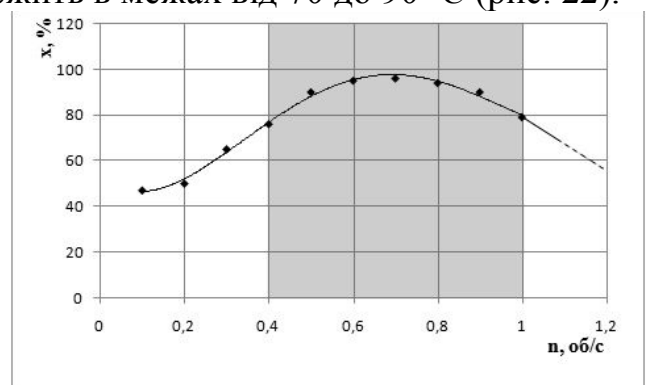


Рис. 23. Вживаність метаногенів $x, \%$ в готовому концентраті в залежності від числа обертів ротора з дисковими насадками $n, \text{об/с}$

Проаналізувавши результати виживаності метаногенів залежно від числа обертів ротора з дисковими насадками, слід зазначити, що занадто малі числа обертів дискових насадок (менше $0,2\text{ об/с}$) призводять до перегріву плівки рідини, вихід життєздатних метаногенів в готовому концентраті був низьким. У той же час при досягненні позначки $1,1\text{ об/с}$ спостерігається зрив плівки газовим теплоносієм з поверхні диска, що є неприпустимим. При математичному моделюванні процесу утворення прикордонного шару рідини на поверхні обертового диска, відзначалися оптимальні значення числа оборотів, а саме до 1 об/с , що є дуже близьким до експериментальних даних. Оптимальний діапазон становить від $0,4$ до 1 об/с (рис. 23).

У п'ятому розділі представлена апаратно-технологічна лінія виробництва рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації роботи біогазової станції. Проведено аналіз економічної та енергетичної ефективності застосування обладнання при виготовленні рідких концентратів метаногенів.

В ІТТФ НАН України розроблена тепломасообмінна технологія одержання рідких концентратів метаногенів (анаеробних мікроорганізмів, які перетворюють субстрат у біогаз), яка реалізується в роторно-дисковому плівковому випарному апараті та допоміжному устаткуванні технологічної лінії. Внесення концентратів метаногенів в метантенки біогазових станцій підвищує загальну концентрацію активних біогаз-продукуючих мікроорганізмів, що позитивно впливає на інтенсивність протікання процесу, його керованість та скорочення періоду зброджування субстрату.

Схема апаратурно-технологічної лінії виробництва рідких концентратів метаногенів представлена на рис. 24.

Технологічний процес одержання рідких концентратів метаногенів відбувається у декілька етапів:

1. Ферментація культуральної рідини метаногенів. В ферментери Ф1, Ф2 (поз. 1, 2) відбувається засів штаму метаногенних бактерій на субстрат. Культивування відбувається при температурі 31–35°C в анаеробних умовах. Температура розчину, що ферментується підтримується за рахунок підводу граючої води в сорочку ферментерів.

2. Охолодження культуральної рідини метаногенів та внесення захисних добавок проводиться за регламентом. Вирощену в анаеробних умовах в ферментерах Ф1, Ф2 (поз. 1, 2) культуральну рідину метанових бактерій передають в збірник ЗБ1 та ЗБ2 (поз. 3, 4) де відбувається її охолодження до 8–10°C за рахунок підведення в сорочку охолоджуючої води. Після охолодження відбувається внесення захисних добавок, для забезпечення максимального виходу життєздатних клітин після концентрування.

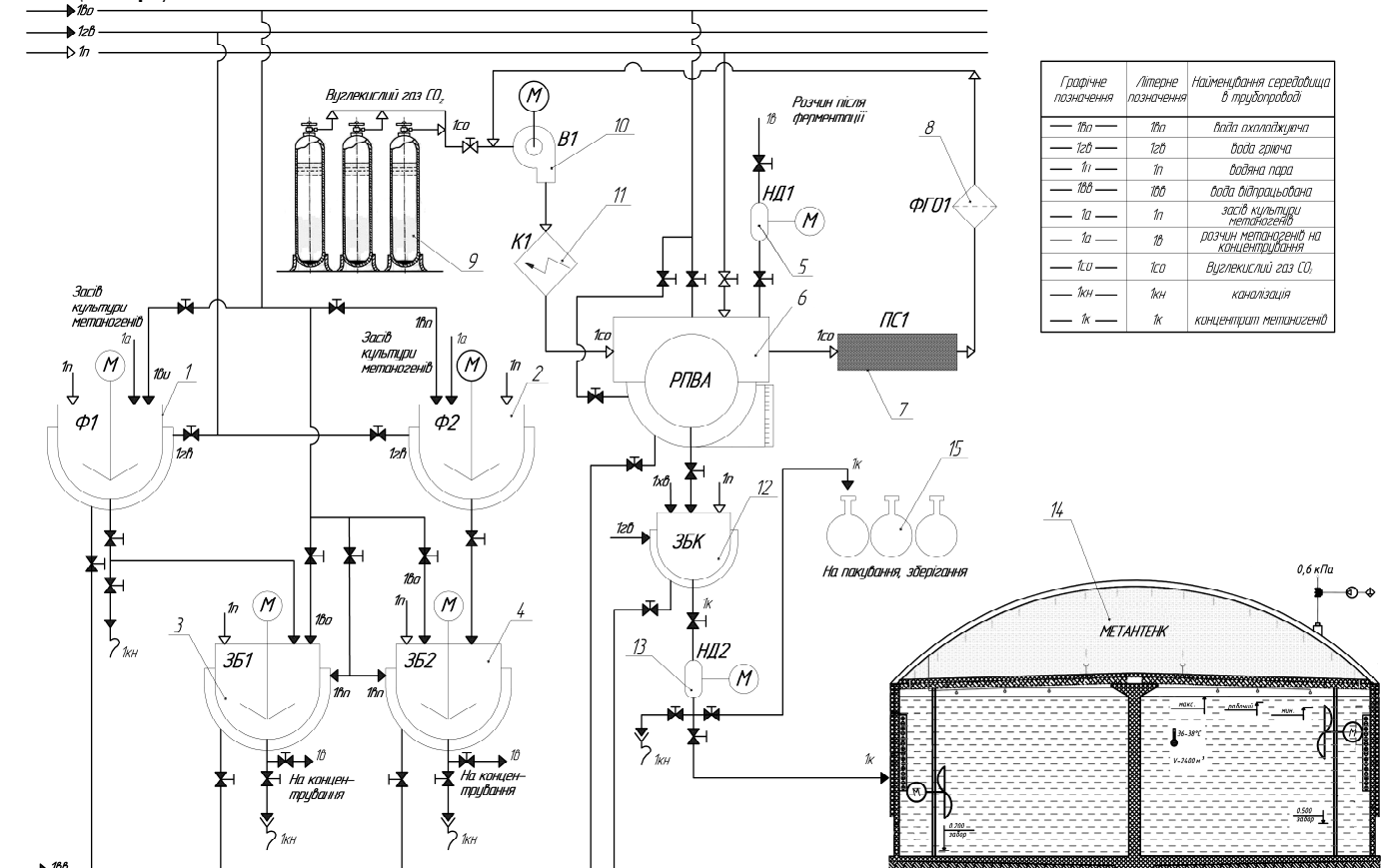


Рис.24. Схема апаратурно-технологічної лінії виробництва рідких концентратів метаногенів.

1, 2 – Ф1, Ф2 – ферментер для вирощування культуральної рідини; 3, 4 – ЗБ1, ЗБ2 – збірник вирощеної культури метаногенів; 5 – НД1 – насос-дозатор подачі розчину культури метаногенів; 6 – РПВА – роторно-дисковий плівковий випарний апарат; 7 – ПС1 – патрон із силікагелем; 8 – ФГО1 – фільтр грубої очистки вуглекислого газу; 9 – Б – батарея вуглекислотних балонів; 10 – В1 – вентилятор; 11 – К1 – Електрокалорифер; 12 – ЗБК – збірник концентрату метаногенів; 13 – НД2 – насос-дозатор подачі концентрату; 14 – метантенк; 15 – лінія фасування концентрату.

3. Концентрування (зневоднення) культуральної рідини метаногенів.

Процес зневоднення охолодженої культуральної рідини метаногенних бактерій відбувається в пристрої для зневоднення анаеробних культуральних рідин в

анаеробних умовах при температурі мокрого термометра, основним апаратом, якого є РПВА (поз. 6) та допоміжне устаткування: патрон із силікагелем ПС1 (поз. 7), фільтр грубої очистки ФГО1 (поз. 8), батарея вуглекислотних балонів (поз. 9), вентилятор В1 (поз. 10), калорифер К1 (поз. 11).

4. Охолодження концентрату культуральної рідини метаногенів. Після процесу зневоднення, рідкий концентрат метаногенів направляєтся в збірник ЗБК1 (поз. 12) для охолодження до температури 8 – 10°C. за рахунок підведення в сорочку охолоджуючої води.

5. Фасування, пакування, зберігання готового продукту. Після охолодження, готовий концентрат метаногенів направляєтся насос-дозатором НД2 (поз. 13) або одразу в метантенк, якщо лінія виробництва рідких концентратів знаходиться безпосередньо в біогазовому комплексі, або на лінію фасування (поз. 15) для подальшого зберігання та можливої реалізації.

Порівняльний аналіз техніко-економічних та енергетичних показників виробництва рідких концентратів метаногенів. Економічний ефект від впровадження технології складає 93 000грн. на рік. Період окупності складає 3 роки. Однак період окупності всього біогазового комплексу (в якому встановлена лінія виробництва рідких концентратів метаногенів) може бути зменшений в 1,5 – 2 рази за рахунок інтенсифікації процесу і відповідно скорочення його тривалості, що є позитивним економічним показником. Також слід зазначити, що для промислової установки раціонально замінити електрокалорифер та патрон з силікагелем на осушувач теплоносія, який працює по принципу теплового насоса, що дасть можливість зменшити енерговитрати майже в 8 разів (електрокалорифер - $N = 4,42 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}(\text{H}_2\text{O})}$, промисловий осушувач $N = 0,53 \frac{\text{кВт} \cdot \text{год}}{\text{кг}(\text{H}_2\text{O})}$).

Таблиця 1

Порівняльний аналіз техніко-економічних та енергетичних показників виробництва рідких концентратів метаногенів.

Показники	Традиційна технологія	Пропонована технологія
Продуктивність, кг/год	10	10
Об'єм концентратів, що виробляється, кг/рік	35 000	35 000
Встановлена потужність, кВт	25	14
Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	1	1
Вартість обладнання, грн	550 000	340 000
Споживання електричної енергії, кВт	25кВт·год×7000год= =175 000 кВт	14кВт·год×7000год= =98 000 кВт
Вартість електричної енергії, грн./кВт*	1,21	1,21
Загальна вартість електричної енергії, грн/рік	1,21 грн/кВт×175 000кВт= =211 750 грн	1,21грн/кВт×98 000кВт= =118 580 грн

Основні результати та висновки:

1. Проведений аналіз існуючих технологій та обладнання для виготовлення рідких мікробіологічних концентратів показав, що головним недоліком практично всіх існуючих технологій є неможливість концентрування метаногенів в анаеробних термолабільних умовах при малих значеннях напруження зсуву.
2. Показано можливість виготовлення рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації виробництва біогазу шляхом використання роторно-дискового плівкового випарного апарату вдосконаленої конструкції.
3. Запропоновані математичні і комп'ютерні моделі розподілу температурних полів по поверхні дискової насадки, механізму утворення плівки рідини на поверхні дискової насадки та розподілу напружень зсуву вздовж поверхні дискової насадки, дозволяють визначати оптимальні вихідні параметри для процесу концентрування в роторно-дисковому плівковому випарному апараті та можуть бути використані при проектуванні стендового та промислового обладнання інших типорозмірів і продуктивності.
4. Проведені розрахунки теплових та енергетичних потоків стендового обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах, дало можливість підібрати вихідні параметри для проведення експерименту.
5. Створений експериментальний стенд та методики проведення досліджень, дозволили визначити тепломасообмінні закономірності процесу зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах.
6. Експериментально визначені напірні, витратні та енергетичні характеристики роторно-дискового плівкового випарного апарата. Відпрацьовані оптимальні режими роботи стенда по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах і підготовлено технологічну інструкцію одержання концентратів метаногенів.
7. Експериментально доведено можливість концентрування розчинів метаногенів в РДПВА з високим виходом життєздатних клітин, активність концентратів складає $1-3 \cdot 10^5$ клітин/мл.
8. Розроблено апаратно-технологічну лінію виробництва рідких концентратів метаногенів.
9. Проведена оцінка енергетичної та економічної ефективності роботи установки для зневоднення термолабільних матеріалів в анаеробних умовах при виробництві концентратів метаногенів.

Умовні позначення: РДПВА – роторно-дисковий плівковий випарний апарат; ТСМ – термометр опору мідний; ТЕН – теплоелектронагрівач; W_r – швидкість в напрямку осі r ; W_φ – швидкість в напрямку осі φ ; W_z – швидкість в напрямку осі z ; τ – час, напруження зсуву; ρ – густина; g – прискорення вільного падіння; λ – коефіцієнт теплопровідності; δ – товщина пограничного шару, товщина дискової насадки; $F_{ин}$ – сила інерції; $F_{тр}$ – сила тертя; G – сила ваги; ν – кінематична в'язкість; μ – динамічна в'язкість; R – радіус дискової насадки; α – коефіцієнт тепловіддачі; $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву; r – питома теплота пароутворення; c – теплоємність; ω – кутова швидкість; $F_{ж.п.}$ – площа живого перетину; G_m – витрата теплоносія; Δ – зміна; x, y, z – Декартові координати; r, φ, z – циліндричні координати; t – температура; V – об'єм; Q – тепло.

Критерії подібності: Re – число Рейнольдса; Nu – число Нуссельта; Gr – число Грасгофа; Pr – число Прандтля.

Основні наукові положення дисертації викладено в роботах:

1. Костик С. І. Тепломасообмінна технологія виробництва концентратів метаногенів [Текст] / Костик С. І., Ободович О. М. // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету - 2013, №12 (75) с. 106 – 111. *(особистий внесок – аналіз та узагальнення літературних даних, розробка технології)*.
2. Ободович О. М. Дослідження процесу зневоднення мікробіологічних матеріалів в роторно-плівковому випарному апараті [Текст] / О. М. Ободович, С. І. Костик // Восточно-европейский журнал передовых технологий - 2013, т. 66. № 6. – с. 36 – 39. *(особистий внесок - планування та проведення експериментальних досліджень, обробка та обґрунтування даних)*.
3. Костик С. И. Исследование технических и теплофизических характеристик универсального сушильного стенда по обезвоживанию термолабильных материалов [Текст] / С. И. Костик, А. Н. Ободович // Молодой ученый. — 2014. — №4. — с. 195-198. *(особистий внесок - планування та проведення експериментальних досліджень, обробка та обґрунтування даних)*.
4. Ободович А. Н. Математическое моделирование процесса образования пограничного слоя на поверхности вращающегося диска, частично погруженного в культуральную жидкость и обдуваемого газовым теплоносителем [Текст] / А. Н. Ободович, Л. И. Ружинская, С. И. Костик // Промышленная теплотехника. — 2014. — №2. — с. 86-93. *(особистий внесок – участь у математичному та комп'ютерному моделюванні та програмуванні в комп'ютерному пакеті)*.
5. Ободович О. М. Апаратурно-технологічна лінія виробництва рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації роботи біогазової станції [Текст] / О. М. Ободович, С. І. Костик // Науково-виробничий журнал «Енергетика та електрифікація» — 2014, 3/14 – с.57 – 59. *(особистий внесок – участь в розробленні апаратурної лінії)*.
6. Ободович О. М. Розрахунок теплових та енергетичних потоків роторно-дискового випарного апарата для зневоднення термолабильних матеріалів [Текст] / О. М. Ободович, С. І. Костик // Международный научно-производственный журнал «Керамика: наука и жизнь» — 2014, 2/23 – с.4 – 13. *(особистий внесок – проведення теоретичних розрахунків)*.
7. Ободович А. Н. Исследование процесса обезвоживания культуральной жидкости метаногенов в роторно-дисковом пленочном выпарном аппарате [Текст] / А. Н. Ободович, С. И. Костик // Промышленная теплотехника. — 2014. — №4. — с. 64-72. *(особистий внесок - проведення експериментальних досліджень, обробка та обґрунтування даних)*.
8. Ободович О.М. Моделювання розподілу полів температур та напружень зсуву вздовж поверхні дискової насадки роторно-дискового плівкового випарного апарата [Текст] / О. М. Ободович, Л. І. Ружинська, С. І. Костик // Науковий журнал «Енергетика і автоматика» — 2014 , 3/14 – с.112 – 118. *(особистий внесок – участь у математичному та комп'ютерному моделюванні та програмуванні в комп'ютерному пакеті)*.
9. Костик С. І. Стан та перспективи розвитку вітчизняного ринку біогазових станцій [Текст] / С. І. Костик, Г. В. Турбінська, О. В. Зозульов // Актуальні проблеми економіки і управління: Зб. наук. праць НТУУ «КПІ» — 2013 , — №7. (електронне видання: <http://probl-ecopomy.kpi.ua/>) *(особистий внесок – аналіз та узагальнення літературних даних)*.
10. Патент на винахід № 105884. Пристрій для зневоднення анаеробних культуральних рідин Костик С. І., Ободович О. М., Андрейчук В. В. МПК В01D 1/22, F26B 3/02 (2006.01), заявка № u 2013 13470, Опубл. 25.06.2014, бюл. №12.

11. Патент на корисну модель №92919. Пристрій для зневоднення розчинів термолабільних речовин. Ружинська Л. І., Костик С. І., Ілляшенко Н. М., Фесенко С. В. МПК В01D 1/22 (2006.01), заявка № у 2014 03472, Опубл.10.09.2014, бюл. № 17.

Окремі аспекти дисертаційної роботи викладено в 8-ми тезах міжнародних конференцій.

АНОТАЦІЯ

Костик С. І. Теплообмін і гідродинаміка при концентруванні розчинів метаногенів в роторно-дисковому апараті. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика, Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, м. Київ, 2014.

У роботі представлено дослідження інтенсифікації виробництва біогазу за рахунок створення теплотехнології і обладнання для виробництва рідких концентратів метаногенів. Показано можливість виготовлення рідких концентратів метаногенів для інтенсифікації виробництва біогазу шляхом використання роторно-дискового плівкового випарного апарату вдосконаленої конструкції. Запропонована математична та комп'ютерна модель механізму утворення плівки рідини на дисковій насадці та розподілу температурних полів та полів напружень зсуву по поверхні дискової насадки, яка дозволяє визначити оптимальні вихідні параметри для процесу концентрування в роторно-дисковому випарному апараті. Можливо використовувати результати моделювання при проектуванні стендового та промислового обладнання інших типорозмірів і продуктивності із оптимальними робочими параметрами. Експериментально визначені напірні, витратні та енергетичні характеристики роторно-дискового плівкового випарного апарата. Відпрацьовані оптимальні режими роботи стенда по зневодненню термолабільних матеріалів в анаеробних умовах і підготовлено технологічну інструкцію одержання концентратів метаногенів. Експериментально доведено можливість концентрування розчинів метаногенів в РДПВА з високим виходом життєздатних клітин, активність концентратів складає $1-3 \cdot 10^5$ клітин/мл. За результатами проведених досліджень запропоновано технологію та обладнання неперервної лінії для одержання рідких мікробіологічних концентратів метаногенів, які в свою чергу використовуються для інтенсифікації виробництва біогазу.

Ключові слова: метаноген, біогаз, концентрування, зневоднення, термолабільні матеріали, тепломасообмін, роторно-дисковий плівковий випарний апарат.

АННОТАЦИЯ

Костик С. И. Теплообмен и гидродинамика при концентрировании растворов метаногенов в роторно-дисковом аппарате. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 - техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика, Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, г. Киев, 2014.

В работе представлено исследование интенсификации производства биогаза за счет создания теплотехнологии и оборудования для производства жидких концентратов метаногенов. Показана возможность получения жидких концентратов метаногенов для интенсификации производства биогаза путем использования роторно-дискового пленочного выпарного аппарата усовершенствованной конструкции. Проведено математическое и компьютерное моделирование

гидродинамических, теплообменных процессов и сдвиговых напряжений в роторно-дисковом пленочном выпарном аппарате. Экспериментально доказана возможность концентрирования растворов метаногенов в РДПВА с высоким выходом жизнеспособных клеток, активность концентратов составляет $1-3 \cdot 10^5$ клеток/мл. По результатам проведенных исследований предложена технология и оборудование для получения жидких микробиологических концентратов метаногенов, которые в свою очередь используются для интенсификации производства биогаза.

Ключевые слова: метаноген, биогаз, концентрирование, термолабильные материалы, теплообмен, гидродинамика, напряжения сдвига, роторно-дисковый аппарат.

ABSTRACT

Kostik S. I. Heat exchange and hydrodynamics during the methanogen solution concentration in rotor-disk evaporator. – Manuscript.

Ph. D. Thesis in Engineering Science with a degree in 05.14.06 – Technical Thermophysics and Industrial Thermal Power Engineering. Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 2014.

This paper presents the research of biogas generation stimulation based on the creation of heat technology and equipment for the production of methanogen liquid concentrates. Methanogen liquid concentrates capability is shown for the stimulation of biogas generation by using of the advanced rotor-disk flash film evaporator. Mathematic and computer simulation of hydrodynamic heat exchange processes and shear stress in rotor-disk flash film evaporator has been conducted. It is experimentally proved that there is a capability of methanogen solutions concentration in RDFFE with the high yield of the living cells, the concentrate activity equals to $1-3 \cdot 10^5$ cells/ml. After considering the results of the conducted research the technology and equipment for the obtaining of liquid microbiological methanogen concentrates have been suggested, which in their turn are used for the biogas generation stimulation.

Key words: methanogen, biogas, concentration, thermolabile materials, heat exchange, hydrodynamics, stress shear, rotor-disk evaporator.