

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ ПЕТРА ВАСИЛЕНКА

Кунденко Микола Петрович

УДК 632.985.4

**МОЛЕКУЛЯРНА АКУСТИЧНА ТЕХНОЛОГІЯ ТА ЕЛЕКТРОННІ
СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ
ВІДТВОРЕННЯ ТВАРИН**

05.11.17 – біологічні та медичні прилади та системи

Автореферат дисертації на здобуття
наукового ступеня доктора технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерства аграрної політики та продовольства України.

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор Черенков Олександр Данилович, Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, професор кафедри технотроніки та теоретичної електротехніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор Піротті Євген Леонідович, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри комп'ютерної математики та математичного моделювання;

доктор технічних наук, професор Червінський Леонід Степанович, Національний університет біоресурсів і природокористування України Кабінету Міністрів, завідувач кафедри електропривода та електротехнологій;

доктор технічних наук, професор Федюшко Юрій Михайлович, Таврійський державний агротехнологічний університет професор кафедри автоматизації сільськогосподарського виробництва.

Захист відбудеться 26. 02. 2013 р. о 10⁰⁰ на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.832.01 у Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Артема, 44.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Артема, 44.

Автореферат розісланий «14» січня 2013 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М.Л. Лисиченко

АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Рішення продовольчої проблеми в Україні вимагає проведення негайних заходів щодо відтворенню тварин. Одним з перспективних напрямків розв'язку такої проблеми є використання методу штучного запліднення тварин. Штучне запліднення тварин дозволяє використовувати генетичний матеріал від потомства видатних самок і самців-поліпшувачів, який зберігається в рідкому азоті при температурі -196°C . У той же час, незважаючи на те, що методи кріоконсервації мікрооб'єктів тваринництва досить вивчені, все-таки проблема підвищення їх стійкості до низьких температур і запліднюваності залишається поки невирішеною.

У дисертаційній роботі вирішується важлива для теорії та практики проблема отримання науково обгрунтованих теоретичних і експериментальних результатів на основі використання низькоінтенсивних акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин перед їх кріоконсервацією з метою підвищення їх стійкості до низьких температур і запліднюючої здатності, а також зниженню кількості мікрооб'єктів у дозах для штучного запліднення. З метою визначення оптимальних параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тваринництва в роботі розглянуте створення електронної системи контролю.

Актуальність теми. Головною проблемою кріоконсервації спермій тварин залишається зниження біологічно повноцінних спермій у процесі кріообробки. Уже на стадії охолодження виникають конфірмаційні зміни ліпопротеїдних комплексів біомембран, які надалі підсилюються при кристалізації й деконсервації та проявляються появою трансмембранних дефектів.

Вони викликають порушення проникності мембран, цілого комплексу біохімічних змін, що призводять до зниження біологічної повноцінності спермій і навіть їх загибелі. При вивченні ультраструктури розморожених спермій за допомогою електронної мікроскопії, було виявлено, що: лише 7,3 % клітин не мають ознак порушень цитоплазматичної мембрани (ЦПМ); 33,7 % мають незначні ушкодження, які проявляються набряканням і невеликим відшаруванням від акросоми, без зміни їх цілісності; 37 % спермій мають середні порушення ЦПМ зі збільшенням її товщини й ознаками зернистого розпаду, а для 22 % характерні розрив цілісності ЦПМ і акросоми з виходом акросомального вмісту й навіть повною деструкцією клітин. При зберіганні розмороженої сперми в клітинах з ушкодженою акросомою відбувається втрата акросомального вмісту, зокрема ферментів, що беруть участь у процесі запліднення. Якщо в розмороженій спермі у звільненому стані перебувало 27,2 % гіалуронідази (до заморожування 22,7 %), то через 4 години інкубації при 38°C вихід її з акросом склав уже 56,9 %.

Короткий аналіз показує, що підвищення запліднюваності тварин і стійкості їх мікрооб'єктів до низьких температур при кріоконсервації може бути здійснене за допомогою низькоінтенсивних акустичних коливань. Застосування низькоінтенсивних акустичних коливань у тваринництві, для впливу на мікрооб'єкти перед їх кріоконсервацією, пов'язане з їхнім максимальним впливом на інформаційні процеси життєдіяльності біологічних об'єктів, які залежать від параметрів акустичних коливань (частота, потужність, експозиція).

Визначення параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин пов'язане як з теоретичними роботами, що досліджують процес взаємодії низькоінтенсивних акустичних коливань із мікрооб'єктами тварин, з урахуванням їх морфологічної будови й акустичних властивостей, так і системами для особистої оцінки параметрів акустичних коливань.

У той час, проведений аналіз робіт вітчизняних і закордонних дослідників показує, що в них відсутня розробка методологічних принципів і моделей вивчення впливу низькоінтенсивних акустичних коливань на життєдіяльність біологічних об'єктів, немає методології визначення чисельних значень акустичних коливань, здатних викликати оптимальний відгук біологічних об'єктів з урахуванням стимулюючого ефекту.

Аналіз існуючих методів і обладнань для оцінки дії низькоінтенсивних акустичних коливань на життєдіяльність мікрооб'єктів тваринництва показує, що вони засновані на різних фізичних принципах і мають певні області застосування. Їм властиві складність апаратурної реалізації, низька інформативність, неможливість контролю стану біологічних об'єктів тваринництва при впливі зовнішніх фізичних факторів.

Одним зі шляхів розв'язку даної актуальної проблеми є розробка моделей і проведення теоретичних досліджень по визначенню необхідних параметрів низькоінтенсивних акустичних коливань, а оптимізацію цих параметрів проводити за допомогою дількометричної системи в міліметровому діапазоні довжин хвиль.

Таким чином, дослідження й розробка способів і технічних систем для підвищення запліднюваності тварин і стійкості їх до низьких температур з використанням низькоінтенсивних акустичних коливань є актуальною проблемою в технологічному процесі відтворення тварин у сільському господарстві. Розв'язок даної проблеми дозволить отримати пріоритетні для України результати у тваринництві й медицині.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тема дисертаційної роботи пов'язана із загальними українськими науковими програмами: постановою Президії Національної академії наук України від 25.02.09 р. № 55 «Основні наукові напрямки, найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природних, технічних і гуманітарних наук на 2009...2013 рр.»; постановою Кабінету Міністрів України

від 7 вересня 2011 року № 942 «Про затвердження переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок до 2015 року». За планами НДР і ОКР Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка були виконані наступні роботи: «Розробка методів ультразвукової технології та електротехнічних систем обробки і технічних заходів контролю якості сільськогосподарської продукції», номер ДР 0102U000686; «Результати експериментальних досліджень по впливу ЕМП КВЧ діапазону на біологічні об'єкти», номер ДР 0104U000372.

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка ефективної низькоінтенсивної акустичної технології та електронної системи контролю для впливу на мікрооб'єкти тварин (спермії, ембріони) перед їх кріоконсервацією з метою підвищення виходу життєздатних мікрооб'єктів після кріоконсервації, підвищення їх запліднюючої здатності й зниження кількості мікрооб'єктів для штучного запліднення в технологічному процесі відтворення тварин.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати наступні завдання:

- обґрунтувати біофізичну дію низькоінтенсивного акустичного поля в технологічних процесах кріоконсервації для збільшення виходу життєздатних мікрооб'єктів (спермії, ембріони);

- розробити математичну модель процесу впливу акустичного поля на кріоконсервуюче середовище, що містить біологічний об'єкт (спермій, ембріон);

- на основі розробленої моделі, при наявності акустичного поля, провести теоретичний аналіз мікропотоків у кріоконсервуючому середовищі й визначити їхню необхідну швидкість поблизу границі мікрооб'єктів;

- використовуючи модель масопередачі в структурі кріоконсервуюче середовище - мікробіологічні об'єкти, провести теоретичний аналіз і визначити параметри низькоінтенсивних акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин перед їх кріоконсервацією;

- провести теоретичний аналіз відкритої резонансної системи для зміни діелектричної проникності рідкого середовища з мікрооб'єктами тварин і визначити її необхідні параметри з урахуванням геометричних і електрофізичних параметрів мікрооб'єктів;

- теоретично визначити ступінь впливу змін діелектричної проникності рідкого середовища з мікрооб'єктами, під впливом акустичного поля, на частоту резонатора;

- теоретично визначити енергетичні і конструктивні параметри високостабільного по частоті твердотілого джерела в міліметровому діапазоні довжин хвиль для виміру змін діелектричної проникності рідкого біологічного середовища;

- провести експериментальні дослідження елементів електронної системи для виміру діелектричної проникності рідких середовищ;
- провести експериментальні дослідження із впливу акустичних коливань на мікрооб'єкти тварин у лабораторних і виробничих умовах.

Об'єкт дослідження

Процес впливу низькоінтенсивного акустичного поля на мікрооб'єкти тварин у технологічних процесах кріоконсервації.

Предмет дослідження

Молекулярна акустична технологія і електронні системи контролю в технологічному процесі відтворення тварин.

Методи дослідження

Для рішення поставленої проблеми були використані методи теоретичної фізики, електродинаміки, радіоавтоматики, методи розв'язку диференціальних і інтегродиференціальних рівнянь, методи біофізики, методи досліджень із мікробіологічними об'єктами тваринництва.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- вперше досліджений процес взаємодії низькоінтенсивних акустичних коливань із мікрооб'єктами тварин перед їх кріоконсервацією і визначена необхідна швидкість мікропотоків у кріоконсервуючому середовищі поблизу границь мікрооб'єктів;
- вперше досліджений процес масопередачі в структурі кріоконсервуюче середовище - мікрооб'єкти й визначені параметри низькоінтенсивних акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин перед їх кріоконсервацією з метою стійкості до низьких температур і підвищення їх запліднюваності;
- вперше обґрунтований метод визначення оптимальних параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин перед їх кріоконсервацією на основі резонансної діелькометрії;
- удосконалені теоретичні дослідження з визначення параметрів відкритої резонансної системи для виміру діелектричної проникності кріоконсервуючого середовища з мікрооб'єктами тварин, які відрізняються від існуючих тим, що враховують геометричні й електрофізичні параметри мікрооб'єктів тваринництва;
- набула подальший розвиток теорія аналізу частотних характеристик лейкосапфірового резонатора в діодних генераторах міліметрового діапазону, яка відрізняється від відомих тим, що в ній враховані параметри діодів і досліджений ряд параметрів генератора: коефіцієнт стабілізації частоти, смуга перебудови частоти;

- уперше математично інтерпретований вплив параметрів низькоінтенсивного акустичного поля на стійкість мікрооб'єктів тварин до низьких температур при кріоконсервації.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на підставі теоретичних і експериментальних досліджень створена низькоінтенсивна акустична технологія й електронна система контролю по визначенню оптимальних параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин ВРХ (спермії, ембріони) перед їх кріоконсервацією з метою підвищення виходу життєздатних спермів і ембріонів після кріоконсервації, підвищення їх запліднюючої здатності й зниження кількості спермів у спермодозах для штучного запліднення. Лабораторні дослідження проводилися зі співробітниками ветеринарної медицини Сахновщинського району. У результаті досліду було встановлено, що опромінення спермодоз акустичним випромінюванням перед їх кріоконсервацією підвищує вихід життєздатних спермів після кріоконсервації до 70...80 %. Результати досліджень були впроваджені в 2010...2012 рр. у Держплемгоспі «Двадцятий» Сахновщинського району Харківської області.

Особистий внесок автора

У наукових роботах, написаних у співавторстві, внесок здобувача полягає в наступному:

- у роботі [3, 5] автором проведений аналіз низькоінтенсивної акустичної технологія для кріоконсервації мікрооб'єктів тваринництва;
- у роботі [6] автором обґрунтоване застосування діодного генератора з діелектричним резонатором. для систем резонансної діелькометрії рідких середовищ у КВЧ діапазоні й стабілізації його частоти;
- у роботі [7] автором перевірені теоретичні дослідження з визначення параметрів відкритої резонансної системи у КВЧ діапазоні для виміру ДП рідких середовищ;
- у роботі [15,18] автором проведені теоретичні дослідження й визначена швидкість мікрооб'єктів у кріоконсервуючому середовищі поблизу мікрооб'єктів тварин.

Апробація результатів дисертації

Основні положення і результати дисертаційної роботи заслухувалися та обговорювалися на:

міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України» (м. Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2010 р.);

міжнародний симпозіум « Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів» (м. Харків, НТУ ХП, 2010 р.);

2-й міжнародній науково-практичній конференції « Науково-інноваційна діяльність і підприємництво в АПК» (м. Мінськ, 2010 р.);

міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України» (м. Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2011р.);

міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні питання енергетики й прикладної біофізики в агровиробництві», (м. Мелітополь, ТДАУ, 2011 р.);

міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми енергозабезпечення й енергозбереження в АПК України» (м. Харків, ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2012р.);

міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні питання енергетики й прикладної біофізики в агровиробництві», (м. Мелітополь, ТДАУ, 2012 р.);

міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях», (м. Полтава, ПНТУ ім. Ю. Кондратюка, 2012 р.).

Публікації

Основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 12 статтях науково-технічних збірників, в 9 статтях науково-технічних журналів і в 3 тезах.

Структура та обсяг дисертації

Дисертація складається з вступу, восьми розділів, висновків, додатків і списку використаних джерел. Вона містить у собі 309 сторінок, 61 рисунок, 14 таблиць, 3 додатка на 9 сторінках, список використаних джерел нараховує 284 найменувань на 28 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації та необхідність розв'язання наукової проблеми, розкривається її сутність і стан, висвітлюється зв'язок роботи з програмами, планами та темами НДР і ДКР, формулюється мета і наукові задачі дослідження, вирішення яких забезпечує досягнення поставленої мети. Визначається наукова новизна, практичне значення отриманих результатів та особистий внесок здобувача в надрукованих роботах, подана інформація щодо апробації дисертаційних досліджень, наводиться перелік робіт, які надруковані за темою дисертації.

У першому розділі «Аналіз проблем кріоконсервації мікрооб'єктів тварин і електронних систем оцінки їх стану» проведено аналіз ролі кріоконсервації спермів і ембріонів у технологічному процесі відтворення тварин, розглянуті методи підвищення біологічно повноцінних спермів і ембріонів тварин при їх

кріоконсервації, а також інформаційні можливості дієлькометрії в сільському господарстві й медицині, аналіз резонансних систем для виміру електрофізичних параметрів речовин і методів побудови джерел КВЧ випромінювання з високою стабільністю їх частоти.

Проведений аналіз показує, що підвищення ефективності штучного запліднення тварин може бути пов'язаний з наступними заходами: у застосуванні більш сучасних технологій консервації сперми на племінних підприємствах, що дозволяє отримати від дорослого бика не 19 тис. спермодоз, а 60...100 тис. спермодоз у рік; у застосуванні більш досконалих технологій деконсервації сперми, що дозволяє збільшити вихід активних спермів у дозі на 20...25 %; у використанні мано- і ректоцервікального методів штучного запліднення корів і телиць, що дозволяє затратити не 4...5 спермодоз на запліднення, а 2...2,5 спермодози; збереження запліднюючої здатності сперми на високому рівні незалежно від строку її зберігання й при використанні для запліднення навіть 3...5 млн. активних спермів у дозі; збереження високого санітарного рівня біологічних і технологічних параметрів законсервованої сперми незалежно від строку зберігання й санітарного рівня навколишнього середовища.

У зв'язку з цим важливою проблемою є всебічне вивчення можливостей збільшення кріорезистивності біологічних об'єктів і пошук способів додаткового кріозахисту їх структур.

Поряд з удосконалюванням таких традиційних підходів, як визначення для кожного біологічного об'єкта кріозахисних середовищ і режимів кріоконсервування, вивчаються можливості використання фізичних факторів, що виявляють оборотно модифікуючий вплив на кріолабільні структури біологічних систем. Одним з таких фізичних факторів є акустичні коливання низької інтенсивності. Ураховуючи це, доцільно досліджувати можливі механізми впливу акустичних коливань із метою оптимізації умов низькотемпературного консервування мікробіологічних об'єктів сільськогосподарських тварин, що дозволить підвищити ефективність способів заморожування й відігрівання біологічних об'єктів (спермії, ембріони) і виявити підходи до використання акустичних коливань при кріоконсервуванні біологічних об'єктів. Істотним питанням при цьому є можливість математичного опису взаємодії акустичних коливань із кріоконсервуючим середовищем, що містить мікробіологічні об'єкти тварин.

При дослідженні стану біологічних об'єктів, що перебувають під впливом різних фізичних факторів, велике значення має вибір методу для контролю стану біологічних об'єктів в даний момент. Таким чином, для виміру параметрів біологічних об'єктів можна застосовувати наступні методи: світлові, теплофізичні, електрофізичні, фізико-хімічні. Із численних методів виміру параметрів біологічних об'єктів уваги заслуговують дієлькометричні методи.

Проведений аналіз показує, що метод дієлькометрії в наш час дозволяє: визначати параметри гідратного оточення біополімерів і їх компонентів (кількість води, міцно зв'язаної в структурі, кількість води, зв'язаної на опущі макромолекули); вивчати зміни конформації при різних факторах впливу (фізіологічно активних добавках, температурі й т. п.); ідентифікувати функціонально значимі зміни конформації при взаємодіях макромолекул у модельних системах (наприклад, фермент-субстрактном зв'язуванні); досліджувати функціонально значимі зміни конфірмацій компонентів клітин у функціонально активному стані (наприклад, при ліганд-рецепторній взаємодії); виявляти роль просторової структури в досліджуваному біологічному процесі; знаходити специфічні внутришньомолекулярні взаємодії, що приводять до конкретних конфірмаційних перебудов; досліджувати процеси функціонування біополімерів у тканинах.

Аналіз вітчизняних і закордонних публікацій показує, створення високочутливої системи дієлькометрії в технологічному процесі кріоконсервації мікрооб'єктів тварин можливо на основі частотного автопідстроювання частоти генератора до частоти високочастотного вимірювального резонатора з мікрооб'єктами тварин. Для стабілізації частоти генератора доцільно використовувати діелектричний резонатор з коливаннями «шепочучої галереї».

У другому розділі «Математичне моделювання процесу впливу акустичного поля на кріоконсервуюче середовище з біологічним об'єктом» розглянуте питання створення математичної моделі, що описує процес впливу монохроматичних акустичних хвиль на кріоконсервуюче середовище, що містить біологічний об'єкт (спермій, ембріон). За допомогою цієї моделі в низькочастотному наближенні отримані аналітичні формули для розрахунків коливальної швидкості й надлишкового тиску, що виникають у кріоконсервуючому середовищі в результаті дифракції акустичної хвилі на біологічному об'єкті. Вказані формули є основою для аналізу процесу масопереносу часток кріоконсервуючого середовища до поверхні біологічних об'єктів при наявності акустичних коливань.

Математичний опис процесу взаємодії монохроматичної акустичної хвилі, що поширюється в кріоконсервуючому середовищі з біологічним об'єктом, приводить до крайових завдань із використанням рівняння Гельмгольца, причому в кріоконсервуючому середовищі поширюється задана монохроматична акустична хвиля з потенціалом швидкостей U^i . У результаті розсіювання цієї хвилі на біологічному об'єкті виникає розсіяна акустична хвиля з потенціалом коливальної швидкості U^s :

$$\Delta U + k^2 U = 0, \quad (1)$$

де k - хвильове число, $k^2 = \omega^2 / c_0^2 - \gamma^2$;

c_0 – швидкість звуку;

ω – кругова частота;

γ – коефіцієнт поглинання.

Оскільки, біологічний об'єкт має вісь симетрії (куля, еліпсоїдальний сфероїд), була введена циліндрична система координат ρ, φ, z , у якій вісь z збігається з віссю симетрії.

У силу аксіальної симетрії біологічного об'єкта, нормальну складову коливальної швидкості на границі біологічного об'єкта (ядро інтегрального рівняння) було представлено у вигляді рядів Фур'є по азимутальній координаті. У результаті вихідне інтегральне рівняння по поверхні біологічного об'єкта зведене до одновимірних інтегральних рівнянь відносно коефіцієнтів Фур'є.

Після ряду перетворень отримали граничне інтегральне рівняння по поверхні біологічного об'єкта:

$$\int_0^\pi X_m(\tau_q) G_m(\tau_p, \tau_q) \sqrt{\rho(\tau_q) \sin \tau_q} d\tau_q = \frac{1}{2\pi} U_m(\tau_q), \quad (2)$$

де p й q – точки простору відповідно навколо й на поверхні біологічного об'єкта.

Одним з визначальних факторів при визначенні швидкості мікропотоків є коливальна швидкість часток середовища в околиці граничної поверхні біологічного об'єкта. Основою для одержання наближених формул для коливальної швидкості U^s й надлишкового тиску $P_n^{[m]}$ в околиці біологічного об'єкта є вираз (3):

$$U^s(x, y, z) = - \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=|m|}^{\infty} (n + 0.5)^{1/2} y_n^m \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi \sqrt{\rho(\tau) \sin \tau} e^{im\phi} \times \\ \times P_n^{[m]}(\cos \tau) G(kR, \tau, \phi, x, y, z) d\tau d\phi, \quad (3)$$

де R – радіус кулі;

$G(kR)$ – функції Гріна.

Після ряду перетворень, одержали наближений вираз для реального значення потенціалу U^s коливальної швидкості (4) і вираз для розрахунків

надлишкового тиску (5) в околиці граничної поверхні біологічного об'єкта (куля – моделюючий ембріон):

$$U^s = - \frac{A e^{-\alpha r} R}{r} \cos k_0 r - \omega t , \quad (4)$$

де A – амплітуда збудливої звукової хвилі з потенціалом швидкостей;
 α – коефіцієнт загасання.

$$P - P_0 = \frac{R A}{r} e^{-\alpha r} \left[-\omega \sin k_0 r - \omega t + \gamma \sin k_0 r - \omega t \right], \quad (5)$$

де P_0 – тиск у незбуреному середовищі.

Коливальна швидкість прийме вид:

$$\vec{V} = \frac{1}{\rho_0} \text{grad } U^s . \quad (6)$$

У сферичній системі координат, пов'язаної з ембріоном, нормальна компонента швидкості V_r , отримана з (11) з урахуванням (9):

$$V_r = \frac{R A e^{-\alpha r}}{r \rho_0} \left[\cos k_0 r - \omega t \left(\alpha + \frac{1}{r} \right) + k_0 \sin k_0 r - \omega t \right]. \quad (7)$$

Як видно з (7), в околиці границі ембріона лише нормальна компонента швидкості V_r , відмінна від нуля. $V_\theta = V_\phi = 0$, $r = x^2, y^2, z^2^{1/2}$.

Увівши сфероїдальні координати й провівши математичні розрахунки, отримано залежність для потенціалу U^s коливальної швидкості в околиці граничної поверхні біологічного об'єкта (еліпсоїдальний сфероїд – моделюючий спермій), при цьому потенціал коливальної швидкості для еліпсоїдального сфероїда по своїй структурі подібний потенціалу для кулі (див. (4))

$$U^s = - \frac{A R e^{-\alpha r}}{r} \cos k_0 r - \omega t , \quad (8)$$

$$R = \frac{2a}{2 + \frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{b}{a + \sqrt{a^2 - b^2}}} . \quad (9)$$

де a и b – відповідно велика і мала піввісь сфероїда.

З (8) випливає, що потенціал коливальної швидкості еліпсоїдального сфероїда на великих відстанях збігається з потенціалом коливальної швидкості сфери з радіусом, що задається по формулі (9). Визначимо тепер поле швидкості (10) і вираз для розрахунків надлишкового тиску (11), як:

$$\vec{V} = \frac{AB \vec{r} e^{-\alpha \frac{r_1+r_2}{2}}}{\rho_0 r_1 r_2} \left[\cos \left(k_0 \frac{r_1+r_2}{2} - \omega t \right) \left(\frac{1}{r_1+r_2} + \frac{\alpha}{2} \right) + \frac{k_0}{2} \sin \left(k_0 \frac{r_1+r_2}{2} - \omega t \right) \right], \quad (10)$$

$$P - P_0 = \frac{AB e^{-\alpha \frac{r_1+r_2}{2}}}{r_1 r_2} \left[\gamma \cos \left(k_0 \frac{r_1+r_2}{2} - \omega t \right) - \omega \sin \left(k_0 \frac{r_1+r_2}{2} - \omega t \right) \right]. \quad (11)$$

де $B = \frac{4a}{2 + \frac{a}{\sqrt{a^2 - b^2}} \ln \frac{b}{a + \sqrt{a^2 - b^2}}}$ – геометричний коефіцієнт еліпсоїдального сфероїда.

Для аналізу процесу масопереносу часток кріоконсервуючого середовища до поверхні мікрооб'єктів тварин при наявності акустичних коливань, необхідно користуватися виразами які встановлюють, що амплітуда коливальної швидкості у поверхні біологічного об'єкта експоненціально зменшується зі збільшенням коефіцієнта загасання кріоконсервуючого середовища й прямопропорційна амплітуді акустичної хвилі й оберненопропорційна лінійному розміру біологічного об'єкта. Ці величини використовуються в наступних розділах для розрахунків швидкості мікропотоків, що виникають у кріоконсервуючому середовищі в околиці біологічних об'єктів і при моделюванні процесу масопереносу часток кріоконсервуючого середовища до поверхні біологічного об'єкта.

У третьому розділі «Теоретичний аналіз мікропотоків у кріоконсервуючому середовищі поблизу біологічного об'єкта при наявності акустичних коливань» на основі формул для коливальної швидкості, отриманих у попередньому розділі, отримані вирази для середнього значення за часом швидкостей мікропотоків поблизу границі біологічних об'єктів (ембріон, спермій). Вказані результати є основою для моделювання процесу

масопереносу часток кріоконсервуючого середовища до поверхні біологічних об'єктів при наявності акустичних коливань.

Для отримання виразу для середнього значення за часом швидкостей мікропотоків поблизу границі біологічних об'єктів (ембріон, спермій) були отримані вирази (12), (13):

$$\eta \left(\overline{\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{V}_2 - \frac{4}{3} \nabla \operatorname{div} \vec{V}_2} \right) + \overline{\nabla P_2} = - \vec{D}_2, \quad (12)$$

$$\overline{\operatorname{div} \vec{V}_2} = - \frac{1}{\rho_0} \overline{\operatorname{div} \rho_1 \vec{V}_1}, \quad (13)$$

де ρ – щільність;

P_0 – статичний тиск;

η – коефіцієнт динамічної в'язкості;

\vec{V} – вектор швидкості;

P – тиск;

∇ – оператор Гамільтона;

$\nabla \varphi = \operatorname{grad} \varphi$ і Δ – оператор Лапласа.

\vec{D} – геометричний фактор, пропорційний безрозмірному масштабу мікропотоків.

Після ряду перетворень були отримані рівняння для визначення швидкості мікропотоків в околиці поверхні біологічного об'єкта. При цьому біологічний об'єкт – ембріон, змодельований геометричним тілом у вигляді кулі в сферичній системі координат r, Θ, φ з початком координат, що збігається із центром кулі (13), а біологічний об'єкт – модель спермія, змодельований геометричним тілом у вигляді еліпсоїдального сфероїда в сфероїдальній системі координат (14):

$$\overline{V}_{r2} = - \frac{R^2 A^2 k_0 (\alpha^2 + k_0^2)}{2 \omega \rho_0^2 r^2} e^{-2\alpha r} + \frac{D_1}{r^2}, \quad (14)$$

де A – амплітуда потенціалу збудливої акустичної хвилі;

R – радіус кулі, моделюючої ембріон;

ω – частота збудливої акустичної хвилі;

α і ρ_0 – відповідно коефіцієнт загасання й щільність кріоконсервуючого середовища.

Інші компоненти швидкості мікропотокую дорівнюють нулю; ($\bar{V}_{\Theta 1} = \bar{V}_{\varphi 2} = 0$, r, Θ, φ – сферичні координати, пов'язані з біологічним об'єктом); D_1 – довільна постійна величина, яку можна визначити із граничної умови на поверхні біологічного об'єкта.

$$\bar{V}_{\xi 1} = - \frac{A^2 B^2 e^{-2\alpha \xi \bar{n}} k_0}{8 \rho_0^2 \omega c^2} \frac{k_0^2 + \alpha^2}{\xi^2 - \eta^2} + \frac{D_2}{\sqrt{\frac{\xi^2 - \eta^2}{\xi^2 - 1}}}, \quad (15)$$

де c_a й η – відповідно швидкість звуку й коефіцієнт динамічної в'язкості кріоконсервуючого середовища.

На підставі отриманих аналітичних виразів для середніх значень швидкостей мікропотоків в околиці біологічних об'єктів (14), (15), одержимо вираз для середнього значення швидкості мікропотокую у випадку біологічного об'єкта ембріон (16) і спермій (17):

$$\bar{V}_e = \frac{1}{\pi f R} \sqrt{\frac{P c_0}{2 S_e \rho_0}}, \quad (16)$$

$$\bar{V}_c = \frac{\sqrt{\frac{P c_0}{2 S_c \rho_0}}}{\pi f a \left(1 + \frac{1}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}} \ln \frac{b}{a \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2} \right)} \right)}, \quad (17)$$

де P – звукова потужність;

S_a – площа поверхні біологічного об'єкта (ембріона);

a і b – відповідно велика й мала півосі еліпсоїдального сфероїда, що моделює спермій,

S_c – площа поверхні спермія.

На основі отриманих виразів (16) і (17) для швидкостей мікропотокую, були проведені чисельні розрахунки. Досліджувалися залежності швидкості мікропотоків від величини звукової потужності збудливої акустичної хвилі і її частоти. Звукова потужність змінювалася в межах $P = 1 \div 5 \text{ мкВт}$, а частота в

межах $f = 10 \div 50 \text{ кГц}$. На рис. 1 а, б наведені результати розрахунків швидкостей мікропотоків для ембріона (рис. 1 а) і спермія (рис. 1 б) залежно від величини звукової потужності при різних значеннях частоти збудливої звукової хвилі. Аналіз цих результатів показав, що при фіксованій частоті акустичної хвилі швидкість мікропотоків монотонно зростає зі збільшенням звукової потужності. Максимальна швидкість мікропотоків як ембріона, так і спермія досягається при потужності $P = 5 \text{ мкВт}$ й частоті $f = 10 \text{ кГц}$. При фіксованій звуковій потужності зі збільшенням частоти швидкість мікропотоків зменшується. Причому мінімальне значення швидкості мікропотоків досягається при частоті $f = 50 \text{ кГц}$ й потужності $P = 1 \text{ мкВт}$ й становить для спермія $\bar{V}_c = 48,84 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а для ембріона $\bar{V}_e = 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

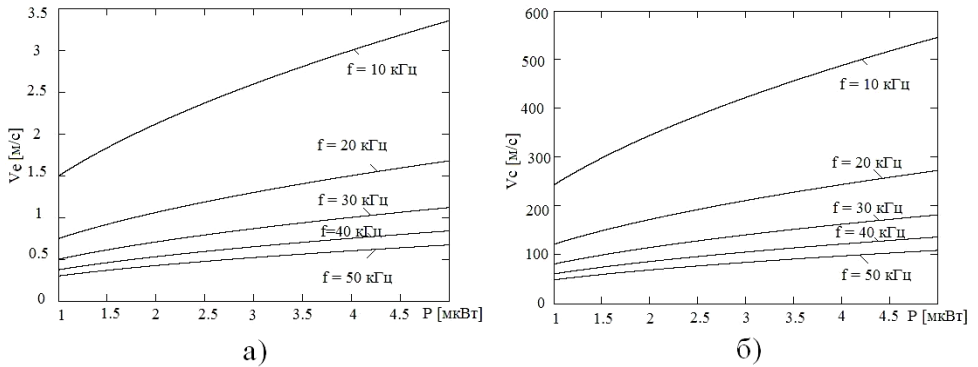


Рис. 1. Залежності швидкостей мікропотоків від звукової потужності при різних частотах: а) – ембріон; б) – спермій

Результати розрахунків показали, що збільшення товщини приграничного шару на плазматичній мембрані мікрооб'єктів тварин, під дією акустичних коливань, можливо при швидкості руху часток мікропотоків кріоконсервуючого середовища в межах 33,4 м/с для спермій і 35,7 м/с для ембріонів.

У четвертому розділі «Модель масопередачі в структурі кріоконсервуючого середовища – біологічний об'єкт» розроблена математична модель, що дозволяє розрахувати градієнт концентрації часток кріоконсервуючого середовища на поверхні біологічного об'єкта при наявності збудливої акустичної хвилі. Під впливом цієї хвилі в околиці граничної поверхні біологічного об'єкта виникають стаціонарні мікропотoki. В околиці біологічних об'єктів у наслідок виникнення мікропотоків, утворюється приграничний шар часток кріоконсервуючого середовища певної товщини δ , (18):

$$\delta_e = \sqrt{\frac{\eta 2 R}{\rho_e \bar{V}_e}}, \quad \delta_c = \sqrt{\frac{\eta 2 a}{\rho_c \bar{V}_c}}, \quad (18)$$

де δ_e й δ_c – відповідно товщина приграншару для ембріона й для спермія;
 η – динамічна в'язкість;

ρ_e і ρ_c – щільності кріоконсервуючих середовищ для ембріона й спермія;
 \bar{V}_e , \bar{V}_c – відповідно середні швидкості мікропотоків для ембріона (19) і спермія (21):

$$\bar{V}_e = \frac{A e^{-\alpha R}}{\rho_0 R} \quad 1 + \alpha R, \quad (19)$$

де A – амплітуда акустичної хвилі,

α – коефіцієнт загасання кріоконсервуючого середовища:

$$\alpha = \frac{8 \pi^2 f^2 \eta}{3 c_0^2 \rho_0}, \quad (20)$$

$$\bar{V}_c = \frac{A B e^{-\alpha c \xi_0}}{2 c^2 \rho_0 \xi_0^2} \quad 1 + \alpha c \xi_0. \quad (21)$$

Скориставшись виразами, для швидкості мікропотоків, були отримані основні рівняння для розрахунків щільності дифузійного потоку до поверхні біологічного об'єкта ембріона (22) і спермія (23) і повного потоку часток кріоконсервуючого середовища (24):

$$j_e = D \left. \frac{\partial q}{\partial r} \right|_{r=R} = D q_2 \exp \left(- \frac{\bar{V}_{r2} R + A_1 2 \alpha \gamma}{D} \right) 2 \alpha R^{-\frac{A_1 2 \alpha}{D}}, \quad (22)$$

$$j_c = D \left. \frac{\partial q}{\partial \xi} \right|_{\xi=\xi_0} = \frac{D q_1^{D/c A_1}}{\xi^2 - 1} \exp \left[- \frac{c A_1}{D} \left(\frac{e^{-2 \alpha \xi}}{\xi} + \gamma + \ell n 2 \alpha \xi \right) - \frac{c D_2}{D} \xi_0 \right], \quad (23)$$

$$\begin{aligned} Q &= 2 \pi R^2 \int_0^{\pi/2} j \sin \Theta \, d \Theta = \\ &= 2 \pi R^2 D q_2 \exp \left(- \frac{\bar{V}_{r2} R + A_1 2 \alpha \gamma}{D} \right) 2 \alpha R^{-\frac{A_1 2 \alpha}{D}}. \quad (24) \end{aligned}$$

Аналіз отриманих результатів дозволив установити, що наявність мікропотоків викликає збільшення концентрації часток кріоконсервуючого середовища у поверхні біологічного об'єкта й приводить до того, що у поверхні біологічного об'єкта утворюється приграничний шар часток кріоконсервуючого середовища із щільністю, що відрізняється від щільності кріоконсервуючого середовища при відсутності акустичних хвиль. З гідродинамічної точки зору утворення такого шару у поверхні біологічного об'єкта еквівалентно збільшенню його об'єму.

Таким чином, були отримані вирази для ефективного коефіцієнта в'язкості кріоконсервуючого середовища з ембріонами (25) і зі сперміями (27), на яке впливає акустична хвиля

$$\bar{\eta}_e = \eta \left[1 + \frac{4 N_e \left(1 + 3 \sqrt{\frac{2\eta}{A}} \right) R^3}{3 R_0^2 h} \right], \quad (25)$$

$$\bar{\eta}_e - \eta_e = \eta \frac{4 N_e \sqrt{\frac{2\eta}{A}} R^3}{R_0^2 h} = \eta \beta_e \sqrt{\frac{2\eta}{A}}, \quad (26)$$

$$\bar{\eta}_c = \eta \left(1 + \frac{4 N_c \left[a b^2 + \delta b^2 + 2 a b \right]}{3 R_0^2 h} \right), \quad (27)$$

$$\bar{\eta}_c - \eta_c = \eta \frac{4 N_c a b b + 2 a}{3 R_0^2 h} \sqrt{\frac{2 F \eta}{A}} = \eta \beta_c \left(1 + \frac{2 a}{b} \right) \sqrt{\frac{2 F \eta}{A}}, \quad (28)$$

де η – коефіцієнт в'язкості кріоконсервуючого середовища;

N_e , N_c – число ембріонів і спермій, що перебувають у кріоконсервуючому середовищі;

h – висота кювети з біологічними об'єктами;

R_0 – радіус кювети;

a і b – відповідно велика й мала півосі сфероїда.

На основі аналізу виразів (25–28) установлено, що, як і у випадку кріоконсервуючого середовища з ембріонами, вплив акустичної хвилі приводить до збільшення ефективного коефіцієнта в'язкості кріоконсервуючого середовища зі сперміями.

На основі теоретичних досліджень встановлено, що для одержання товщини приграншарів на плазматичній мембрані мікрооб'єктів тварин, 1,8 мкм для ембріонів і 0,4 мкм для спермій, необхідно створювати акустичними коливаннями в кріоконсервуючому середовищі швидкість мікропотоків 35,7 м/с для ембріонів і 33,4 м/с для спермій.

Доведено, що обробка акустичними коливаннями кріоконсервуючого середовища з мікрооб'єктами тварин (частота 0,98 кГц, потужність 1,07 мкВт, час обробки 307 с) приводить до збільшення в 10 разів товщини захисного шару на плазматичній мембрані мікрооб'єктів у порівнянні з неопрацьованим середовищем.

У п'ятому розділі «Аналіз відкритої резонансної системи для виміру діелектричної проникності рідких середовищ» проведені теоретичні дослідження резонансних систем для виміру електрофізичних характеристик речовин, що містяться у відрізьку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора.

У результаті проведених теоретичних досліджень по збудженню на відрізьку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала резонатора, хвилі TM_{01} за допомогою коливання TEM_{01q} було отримане вираз для визначення ефективності збудження хвилі TM_{01} у круглому хвилеводі:

$$\alpha = \frac{128}{\pi^2} \tilde{a}^4 \frac{\left| \int_0^1 u^2 \exp -u^2 \tilde{a}^2 J_1 2,405 u \, du \right|^2}{J_2 2,405^2}, \quad (29)$$

де a – радіус круглого хвилеводу, $u = \rho / a$, $\tilde{a} = a/w_0$;

ρ - щільність кріоконсервуючого середовища;

w_0 – радіус плями поля основного коливання TEM_{00q} ВР у площині $Z = 0$.

Результати розрахунків ефективності збудження хвилі TM_{01} на відрізьку круглого хвилеводу за допомогою виразу (29) представлена на рис. 2 (крива 1)

Як слідує з рис. 2, ефективність збудження хвилі TM_{01} у круглому хвилеводі має явно виражений максимум при зміні його радіуса, а величина α досягає максимального значення рівного 0,677, при $\tilde{a} = 1,433$.

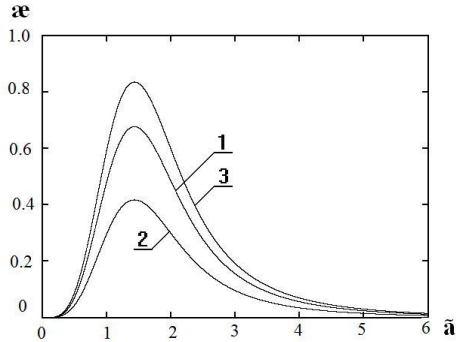


Рис. 2. Ефективність збудження хвилі TM_{01} на відрізку круглого хвилеводу, виконаного в центрі плоского дзеркала ВР, за допомогою коливань TEM_{01q} і TM_{01q} резонансної системи

Крива (2) на рис. 2 характеризує ефективність збудження хвилі TM_{10} у круглому хвилеводі з урахуванням орієнтації вектора напруженості електричного поля у відкритому резонаторі. У цьому випадку також має місце явно виражений максимум ефективності збудження розглянутої хвилі в круглому хвилеводі при зміні його радіуса (\tilde{a}). Величина збудження хвилі a досягає максимуму, рівного 0,418, при значенні $\tilde{a}=1,433$.

Крива (3) на рис. 2 характеризує збудження хвилі TM_{01} у круглому хвилеводі за допомогою аксиально-симетричного коливання TM_{01q} , у яке перетвориться вихідне коливання відкритого резонатора TEM_{01q} , при наявності короткозамикаючого поршня у хвилеводі. З рис. 2 видно, що, як у попередніх випадках, є явно виражений максимум по a , який має величину 0,835 при $\tilde{a}=1,433$.

Для визначення добротності відкритої резонансної системи в режимі слабкого зв'язку, резонатор може бути представлений у вигляді послідовного або паралельного коливального контуру.

Аналіз еквівалентної схеми відкритого резонатора показує, що добротність може бути представлена виразом:

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{3X}} + \frac{1}{Q_{BH}}, \quad (30)$$

де Q_0 – власна добротність;

Q_{3X} - добротність зв'язку із хвилеводом, що підводить;

R_H - характеризує зв'язок з вільним простором.

$$Q_0 = \frac{n_1^2 n_2^2 \omega_p L_0 + n_1^2 \omega_p L_{3X}}{n_1^2 n_2^2 R_0}, \quad (31)$$

$$Q_{3X} = n_1^2 n_2^2 \omega_p L_0 + n_1^2 \omega_p L_{3X} / Z_0, \quad (32)$$

$$Q_{BH} = \frac{n_1^2 n_2^2 \omega_p L_0 + n_1^2 \omega_p L_{3X}}{n_1^2 R_H}. \quad (33)$$

При поміщенні ВР в екрануючий металевий циліндр навантажена добротність Q_H , як екранованого відкритого, так і об'ємного резонаторів, визначена власною добротністю Q_0 й добротністю зв'язку Q_{3X} .

Увівши коефіцієнт зв'язку хвилеводного тракту з відкритою резонансною системою (ВР і вільний простір), як відношення потужності, розсіяної в зовнішньому колі, до потужності, розсіяної в резонаторі й оточуючому його просторі, одержали вираз для навантаженої добротності Q_H ВР:

$$Q_f = \alpha_1 Q_0 / 1 + \beta_3, \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \text{де } \alpha_1 = & \frac{\left[\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \left(1 - 2 |\Gamma_{EBP}| \cos \varphi + \Gamma_{EBP}^2 \right) + 2 |\Gamma_{EBP}| \sin \varphi \right]^{1/2}}{\left[\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \left(1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2 \right) + 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi \right]^{1/2}} \times \\ & \frac{\left[1 - 2 |\Gamma_{OP}| \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2 - 2 |\Gamma_{OP}| \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}{\left[1 - 2 |\Gamma_{EBP}| \cos \varphi + \Gamma_{EBP}^2 - 2 |\Gamma_{EBP}| \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}, \quad (35) \end{aligned}$$

$$\text{де } \Gamma_{OP} = \frac{n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_I - Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 R_I + Z_0} = \frac{1 - \beta_3}{1 + \beta_3}, \quad (36)$$

$$\Gamma_{EBP} = \frac{n_1^2 n_2^2 R_0 - Z_0}{n_1^2 n_2^2 R_0 + Z_0} = \frac{1 - \beta_1}{1 + \beta_1}, \quad (37)$$

- коефіцієнти відбиття в перетинах еквівалентної схеми; n – коефіцієнти трансформації; Z_0 – хвильовий опір лінії; R_0 – опір втрат у контурі схеми; $\varphi = 2r\Delta e$, $r = \frac{2\pi}{\lambda b}$; λb – довжина хвилі у хвилеводі, м.

Отримані вирази показують, що навантажена добротність ВР у порівнянні з навантаженою добротністю об'ємного резонатора, що має таку саму власну добротність Q_0 і такий самий зв'язок із хвилеводом, що підводить $\beta = \beta_3$, менше в α раз. Вираз (34) дозволяє за обмірюваними значеннями Q_f , β_3 і α визначити власну добротність Q_0 ВР.

На основі проведених обчислень були отримані вираження для коефіцієнтів зв'язку β_3 й β_1 , через основні параметри ВР

$$\beta_2 = \frac{\beta_1 - \beta_3}{\beta_3}, \quad Q_0 = \frac{\beta_1}{\beta_3} \frac{1 + \beta_3}{\beta_3} Q_H, \quad Q_{3X} = \frac{Q_0}{\beta_1}, \quad Q_{BH} = \frac{\beta_3}{\beta_1 - \beta_3} Q_0. \quad (38)$$

У режимі сильного зв'язку ВР був представлений еквівалентною схемою у вигляді паралельного коливального контуру, для якого були визначені добротності :

$$Q_0 = n_1^2 n_2^2 R_0 \frac{\omega_p C_0}{n_1^2 n_2^2}, \quad (39)$$

$$Q_{3X} = Z_0 \frac{\omega_p C_0}{n_1^2 n_2^2}, \quad (40)$$

$$Q_H = \frac{Z_0 n_1^2 R_f n_1^2 n_2^2 R_0}{Z_0 n_1^2 R_f + n_1^2 R_f n_1^2 n_2^2 R_0 + n_1^2 n_2^2 R_0 Z_0} \frac{\omega_p C_0}{n_1^2 n_2^2}, \quad (41)$$

де Q_0 - власна добротність;

Q_{3X} -- добротність зв'язку із хвилеводом, що підводить;

Q_H -- навантажена добротність.

У результаті перетворень, було отримане співвідношення для навантаженої добротності $Q_H = Q_0 / (1 + \beta_1 + \beta_2)$.

Це співвідношення збігається з аналогічним виразом, отриманим для випадку слабкого зв'язку резонатора з хвилеводним трактом. Наявність зв'язку з вільним простором (β_2) відрізняє отриманий вираз для навантаженої добротності ВР від подібного співвідношення для об'ємних резонаторів, тому вираз для навантаженої добротності Q_f визначається:

$$Q_f = \frac{\alpha_2 Q_0}{1 + \beta_3}. \quad (42)$$

Вираз (42) дозволяє за обмірюваними значеннями Q_H , β_3 і α_2 визначити власну добротність Q_0 ВР.

У виразі (42) ефективність збудження коливань у ВР у режимі сильного зв'язку визначається залежністю:

$$\alpha_2 = \frac{\left[\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \left(1 - 2 | \Gamma_{OP} | \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2 \right) + 2 | \Gamma_{OP} | \sin \varphi \right]^{1/2}}{\left[\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \left(1 - 2 | \Gamma_{EBP} | \cos \varphi + \Gamma_{EBP}^2 \right) + 2 | \Gamma_{EBP} | \sin \varphi \right]^{1/2}} \times \frac{\left[1 - 2 | \Gamma_{EBP} | \cos \varphi + \Gamma_{EBP}^2 - 2 | \Gamma_{EBP} | \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}{\left[1 - 2 | \Gamma_{OP} | \cos \varphi + \Gamma_{OP}^2 - 2 | \Gamma_{OP} | \sin \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right]^{1/2}}. \quad (43)$$

Проведені експериментальні й теоретичні дослідження підтвердили правильність вибору еквівалентних схем представлення параметрів ВР залежно від величини зв'язку з підводячим хвилеводним трактом.

Розрахункові залежності добротностей Q_H , Q_{3X} і Q_0 від відстані між дзеркалами L/R для коливання TEM_{01q} , збуджуваного в напівсферичному ВР щільним елементом зв'язку й утримуючим відрізок круглого хвилеводу, представлені на рис. 3.

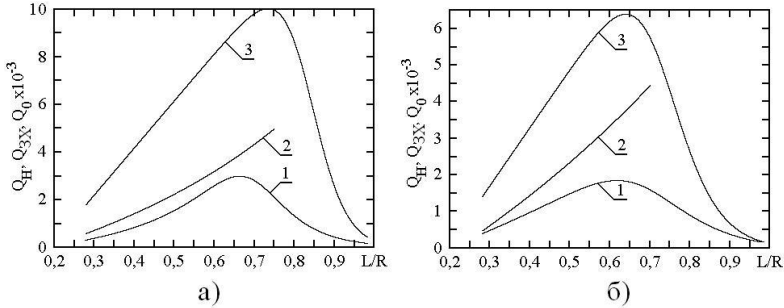


Рис. 3. Розрахункові залежності добротностей Q_H , Q_{ZX} і Q_0 від відстані між дзеркалами L/R для коливання TEM_{01q} , збуджуваного в напівсферичному ВР щільним елементом зв'язку (а) і збуджуваного в напівсферичному ВР, що містить відрізок понадрозмірного круглого хвилеводу (б)

Як впливає з залежностей (рис. 3), наявність хвилеводу приводить до додаткових омичних втрат для резонансної системи.

На підставі досліджень особливостей збудження хвилі TM_{01} на відрізку круглого хвилеводу, виконаного в центрі одного із дзеркал резонатора, за допомогою першого вищого неаксильно-симетричного коливання TEM_{01q} , ставиться завдання знаходження співвідношень, які зв'язують зміну діелектричної проникності середовища, поміщеної в резонатор, зі зміною резонансних частот самого резонатора.

У шостому розділі «Теоретичне обґрунтування впливу змін діелектричної проникності рідкого середовища на частоту резонатора» був досліджений резонатор, що містить кювету з рідким середовищем (кріоконсервуюче середовище з біологічними об'єктами типу ембріони або спермії) з метою отримання аналітичних залежностей для резонансних частот, як порожнього резонатора, так і резонатора, що містить кювету з рідким середовищем.

Для рішення задачі про власні частоти й коливання такого резонатора був використаний метод Гальоркіна з вибором пробних функцій, що задовольняють граничній умові на дзеркалах резонатора (рівність нулю тангенціальних компонентів електричного поля на поверхні дзеркал).

Провівши теоретичні дослідження резонатора, змодельованого ідеально провідними дзеркалами сферичної й циліндричної форм, одержали вирази для розрахунків резонансної частоти (44) і компонентів електричного поля власного коливання (46):

$$f_m = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{m^2 \pi^2}{L_1^2} + \mu^2 P}, \quad (44)$$

$$P = \frac{2h}{a^2 L_1} + \frac{2L - \delta}{L_1 a_1^2} + \frac{1}{R L_1} \ell n \frac{2R}{2R - \delta}, \quad (45)$$

де c – швидкість світла в середовищі, що заповнює резонатор;

m – кількість осциляцій поля вздовж осі резонатора;

$L_1 = h + L$, L – відстань між дзеркалами резонатора;

$2a_1$ і R – відповідно апертура й радіус кривизни сферичного дзеркала;

$2a$ і h – відповідно діаметр і висота циліндричного дзеркала.

$$\delta = R \left(1 - \sqrt{1 - a_1^2 / R^2} \right).$$

$$E_r^m = - \frac{c C_m}{i 2 \pi f_m b^2 z} J_0 \left(\frac{\mu r}{b z} \right) \cos \frac{\pi m}{L_1} z. \quad (46)$$

З виразу (46) і властивостей функції Бесселя нульового порядку встановлено, що модуль E_z^m – компоненти електричного поля приймає максимальне значення на осі резонатора $r = 0$. При цьому модуль E_r^m – компоненти електричного поля обертається в нуль при $r = 0$ (тобто на осі резонатора). Такий розподіл електричного поля власного коливання дозволив встановити, що кювету з досліджуванним рідким середовищем слід поміщати вздовж осі резонатора й усередині циліндричного дзеркала.

У результаті досліджень зміни діелектричної проникності рідкого середовища, що перебуває в кюветі, зі зсувом резонансних частот резонатора, отримане співвідношення, яке зв'язує зміну резонансної частоти зі зміною діелектричної проникності рідкого середовища, що перебуває в кюветі:

$$f_2 - f_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 f_m A_m. \quad (47)$$

Були проведені чисельні розрахунки зсуву резонансної частоти $\Delta f = f_2 - f_1$ залежно від зміни відносної діелектричної проникності $\Delta \varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2$ рідкого середовища, що перебуває в кюветі циліндричної форми, розташованої в резонаторі.

Геометричні параметри резонатора були обрані наступні: радіус кривизни $R=110$ мм і апертура $2a_1=60$ мм сферичного дзеркала; радіус $a=12$ мм і висота $h=12,3$ мм циліндричного дзеркала; відстань між дзеркалами $L=63,69$ мм. Цим параметрам відповідає резонансна частота $f_m=74,278$ ГГц. Геометричні параметри кювети: $R_1=2,5$ мм – радіус циліндра, $h_1=3$ мм – висота циліндра.

Відзначено, що при збільшенні відносної діелектричної проникності рідкого середовища на величину $\Delta \varepsilon$, що змінюється в межах $10^{-3} \leq \Delta \varepsilon \leq 5 \cdot 10^{-3}$, резонансна частота зменшується на величину Δf , що змінюється в межах $7,8 \text{ МГц} \leq \Delta f \leq 39 \text{ МГц}$. Це дозволило здійснювати контроль зміни діелектричної проникності рідкого середовища. Результати розрахунків представлені на рис. 4.

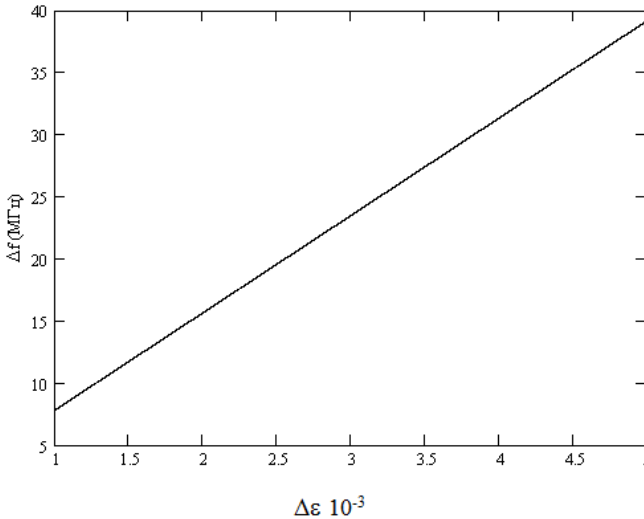


Рис. 4. Залежність зсуву резонансної частоти від зміни діелектричної проникності рідкого середовища

Проведені дослідження довели, що точність вимірів ДП залежить від стабільності частоти генератора й добротності вимірювального резонатора, тому необхідна подальша розробка джерел коливань КВЧ діапазону, призначених для виміру змін діелектричних параметрів рідини, які забезпечували б не лише необхідний рівень потужності, що підводиться, й частоти сигналу, але й задовольняли б високим вимогам по стабільності частоти, ступеню заглушення дискретних складових у спектрі вихідного сигналу, габаритам, надійності, економічності й терміну служби.

У цьому розділі «Теоретичне обґрунтування створення високостабільних твердотільних джерел КВЧ діапазону хвиль» були використані методи квазіоптики при дослідженні діелектричних резонансних систем напівпровідникових джерел НВЧ-випромінювання короткохвильової частини міліметрового діапазону довжин хвиль, призначених для виміру змін діелектричних параметрів рідини.

З метою дослідження колювання «шепчучої галереї» HE_{nml} для різних значень азимутального індексу n необхідно досліджувати залежності резонансних частот і радіаційних добротностей від зміни товщини резонатора. Встановлено, що значенням товщини резонатора, при яких спостерігається максимальна радіаційна добротність, відповідають резонансні частоти, при яких тангенціальні компоненти електричного поля практично близькі до нуля на бічній поверхні резонатора. Це можливо, якщо резонансне хвильове число k_0 й постійна поширення β вздовж осі резонатора задовольняють рівнянню

$$I_n R \sqrt{k_0^2 \varepsilon_{\perp} - \beta^2} \cong 0, \quad (48)$$

при цьому отримано вираз з геометричними й електродинамічними параметрами резонатора:

$$f = \frac{cV_{nl}}{2\pi R \sqrt{\varepsilon_{\square}}} \sqrt{1 + \frac{2\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_0}{\varepsilon_0 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\square}}{\varepsilon} \left(\frac{LV_{nl}}{R} \right)^2} \right)}}. \quad (49)$$

Запропонований і досліджений квазіоптичний лейкоафіровий напівдисківий резонатор, збуджуваний прямокутними щілинами зв'язку із твердотільними активними елементами В якості резонансної системи обраний напівдисківий резонатор, що працює на колюваннях «шепчучої галереї», HE_{nml} , який устанавлювався на провідній площині ЛПД устанавлювався в центрі широкої стінки хвилеводу з розмірами $a = 3,6$ мм і $b = 1,8$ мм. Резонатор мав наступні геометричні розміри: діаметр $D = 20$ мм, товщину $L = 2$ мм, формат $L/R = 5$. Відхилення геометричної осі від кристалографічної (оптичної) осі складало п'ять кутових хвилин. Діелектричні проникності й тангенс кута втрат: $\varepsilon_{\perp} = 9,4$; $\varepsilon_{\square} = 11,54$; $\operatorname{tg} \delta = 5 \cdot 10^{-5}$. Власна добротність резонатора $Q_{or} = 2 \times 10^4$.

Для визначення стабільності параметрів стаціонарного режиму була розглянута стійкість частоти коливань до малих гармонійних збурювань струму живлення діода $I = I_0 + \Delta I_0 e^{j\omega t}$, при дії збурюючої шумової напруги з амплітудою $e_{ш}$ й до малої зміни температури напівпровідникової структури:

$$\frac{\Delta \omega_c}{\omega_c} = \frac{T_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_1)}{T_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \Delta I^{\circ}, \quad (50)$$

$$\frac{\Delta \omega_c}{\omega_c} = \frac{e_{ш}}{i_{mc} \omega_c T_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (51)$$

$$\frac{\Delta \omega_c}{\omega_c} = \frac{-T_4 \sin(\varphi_1 - \varphi_4)}{T_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}, \quad (52)$$

$$\text{де } T_2 e^{j\varphi_2} \equiv \frac{\partial(Z_l + Z_d)}{\partial \omega}; \quad T_3 e^{j\varphi_3} \equiv \frac{\partial Z_d}{\partial I}; \quad T_4 e^{j\varphi_4} \equiv \frac{\partial(Z_l + Z_d)}{\partial \theta}.$$

Співвідношення (50–52), що описують модуляційні й шумові характеристики генератора, показують, що стабільність частоти автоколивань визначається фіксуючою здатністю генератора по частоті.

З умови стійкості стаціонарних коливань і співвідношень спектральна щільність відносної потужності амплітудного шуму $S_a(F)$ й фазового шуму $S_{\varphi}(F)$ на частоті відбудови від частоти несучої ω_0 визначається виразами:

$$S_m(F) = 10 \log \frac{S_{ml}}{\Delta F} \left[\frac{T_3}{T_1} \left| \frac{\sin(\varphi_2 - \varphi_3)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \right| \right]^2, \quad (53)$$

$$S_{\varphi}(F) = 10 \log \frac{S_{ml}}{F^2 \Delta F} \left[\frac{T_3}{T_2} \left| \frac{\sin(\varphi_3 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_1 - \varphi_2)} \right| \right]^2, \quad (54)$$

де $S_{ml}(F) = 0,5 \delta I_m / I_0^2$ – спектральний розподіл відносної потужності амплітудних флуктуацій струму живлення діода.

У результаті експериментальних досліджень відзначено, що амплітудні й фазові шуми вихідного сигналу обернено пропорційні фіксуючій здатності генератора $K_{\omega} = T_2 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)$. Найбільше зменшення шумових параметрів частотно стабілізованих генераторів досягається при такому настроюванні, коли фазова відстань між діодом і резонатором становить $\varphi_1 - \varphi_2 \approx n\pi / 2$.

На основі застосування високодобротних резонаторів, власна частота яких управляється регульованою ємністю варакторного діода, створено частотно стабілізований генератор з електричною перебудовою частоти. Розглянута конструкція хвильоводно-резонаторного кола представлена на рис. 5. Напівдисковий стабілізуючий резонатор 1 радіусом R розміщено на металевому дзеркалі 2 і пов'язаний із хвильоводами 3 і 4 розмірами $a=3,6$ мм, $b=1,8$ мм прямокутними щілинами зв'язку 5 з розмірами b_1 й b_2 . Варактор 6 розміщений у центрі широкої стінки хвильоводу, на відстані l_r від резонатора; на відстані l_p від варактора розміщений короткозамикаючий поршень 7.

Зв'язок резонатора із хвильоводами здійснюється прямокутними звуженими щілинами 5, широкі стінки яких орієнтовані паралельно радіусу резонатора R . Такий варіант зв'язку представлений еквівалентною схемою, у якій реактивності зв'язку $X_i (i=1,2)$ включаються послідовно (рис. 6).

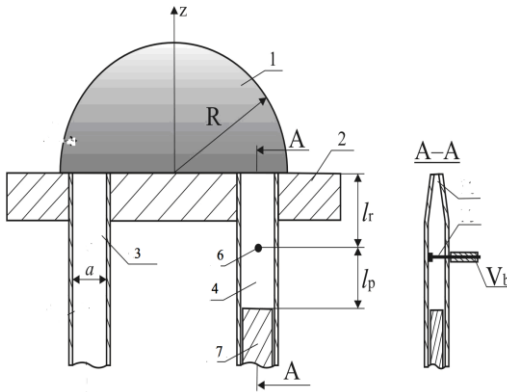


Рис. 5. Конструкція напівдискового резонатора, що перебудовується варактором: 1 – напівдисковий стабілізуючий резонатор; 2 – металеве дзеркало; 3, 4 – хвильоводи

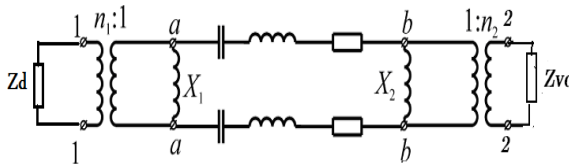


Рис. 6. Еквівалентна схема послідовного включення варактора в резонатор: Z_{vc} – імпеданс варакторної секції, приведений до клем 2-2; n_i – ідеальні трансформатори; Z_p – вхідний імпеданс короткозамкнений

Еквівалентна схема варактора у хвилеводно-штировій секції представлена на рис. 7. Клеми 3-3 і 4-4 відповідають перетину штиря у хвилеводі. Параметри $L_1, C_1, C_2, C_s, L_s, n$ описують індуктивний штир з ємнісним зазором у прямокутному хвилеводі; параметри C_k й L_k – ємність і індуктивність корпуса варактора відповідно. Передбачається, що опір втрат варактора R_s не залежить від напруги зсуву U .

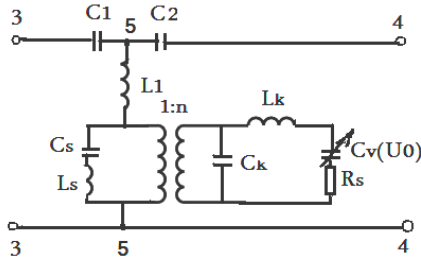


Рис. 7. Еквівалентна схема варактора у хвилеводно-штировій секції

Перебудова частоти генератора здійснювалася варактором типу 3А639 В з наступними параметрами: коефіцієнт перекриття по ємності $K_V = C_V(0) / C_V(U_{max}) = 2,8$; $\varphi_k = 0,7B$; $C_V = 0,06 - 0,14n\Phi$; $R_s = 0,5 \text{ Ом}$; $C_k = 0,1n\Phi$; добротність діода ($U_{обер.} = -6U$) $Q_V = 3000$. Розсіюча безперервна потужність на варакторі $P_V = 10-15 \text{ мВт}$. Якість варактора характеризується постійною часу $\tau = R_s C_V(0)$.

Варакторна перебудова резонатора характеризується відносною шириною перебудови $\Delta\omega_{\pm} / \omega_0$, мінімальними й максимальними величинами власної добротності Q_{\pm}^{\min} , Q_{\pm}^{\max} , фазовою відстанню між варактором і поршнем $\varphi_{\pm p} = 2\pi l_p / \Lambda_2 = \varphi_0 + \Delta\varphi$, де $\varphi_0 = k\pi \Delta\varphi \approx \pi$.

Лінійність функції $\omega_{\pm}(U)$ може бути досягнута шляхом реалізації на клеммах 5-5 (рис. 7) резонансу в колі варактора із застосуванням короткозамикаючого поршня. Аналіз показує, що ряд особливостей реальних систем принципово важливий при розгляді варакторної перебудови.

Імпеданс варакторної секції Z_{VC} (рис. 7) можна представити у вигляді:

$$Z_{VC} = R_{VE} + j(\omega L_E - \frac{1}{\omega C_E}), \quad (55)$$

$$\text{де } L_E = \frac{Z_2 \varphi_0 \chi}{2}; \quad C_E = \frac{2}{Z_2 \varphi_0 \chi \omega_\pi}; \quad \chi = \frac{1}{1 - \left(\frac{\lambda_\pi}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}; \quad \omega_\pi = \frac{\pi c}{l_p} \sqrt{1 - (2l_p / \lambda_{\text{кр}})^2};$$

$$Z_{VE} = Z_V + j\omega(L_k + L_2 - C_1); \quad \lambda_\pi = \lambda(\omega_\pi),$$

де C - швидкість світла у вакуумі;

$\lambda_{\text{кр}}$ - критична довжина хвилі у хвилеводі $\lambda_{\text{кр}} = 2a$.

Частота системи резонатор – варакторна секція визначається співвідношенням:

$$\omega_+(U) = \frac{\omega_0}{2} \left[2 + \delta(U) + \sqrt{\delta^2(U) + \alpha} \right], \quad (56)$$

$$\text{де } \delta(U) = \frac{\omega_V(U) - \omega_p}{\omega_p}; \quad C_\Sigma(U) = \frac{C_V(U)C_E}{C_V(U) + C_E}; \quad L_\Sigma = L_E + L_K + L_2;$$

$\alpha = Z_2 / \omega_p L_\Sigma Q_0$ – еквівалентний параметр зв'язку;

ω_p - резонансна частота резонатора з урахуванням реактивностей зв'язку X_1 й X_2 .

У реальних хвилеводних системах виконуються умови $C_E \ll C_V(U)$; $L_E \ll L_K + L_2$ й з наведених співвідношень випливає, що дисперсія істотно впливає на смугу варакторної перебудови й на її лінійність. Критичність настроювання резонатора на задану смугу ω_+ визначається величиною параметра зв'язку $\alpha \approx 2\beta_2 / \varphi_0 \chi Q_0$ й зменшується при її збільшенні. Чисельні результати показують, що для заданої величини Z_2 компенсація нелінійності перебудови досягається при цілком певних значеннях зв'язку. Зі співвідношення (56) можна визначити смугу перебудови частоти із заданим коефіцієнтом нелінійності μ при виконанні умови:

$$\frac{2 - \eta}{2 + \eta} F < \beta_2 < \frac{2 + \eta}{2 - \eta} F, \quad (57)$$

$$\text{де } F = \frac{2K_V - 1}{2} \frac{Q_0}{\varphi_0 \chi} \left[\frac{1}{Z_2 \omega_p C_V(U_0)} \right]^2.$$

З виразу (57) випливає, що для ліанеризації перебудови частоти доцільно зменшити хвильовий опір варакторної секції Z_2 , а також параметри дисперсії χ , оскільки при цьому зростає величина оптимального зв'язку β_2 й зменшується критичність її вибору.

На рис. 8 наведені характеристики $\Delta\omega_+(U)/\omega_0$ для випадку застосування додаткового резонансного контуру з добротним варакторним діодом ($Q_V = 3000$). З розрахунків випливає, що критичність настроювання резонансної системи на лінійність зростає при збільшенні добротності варакторної секції.

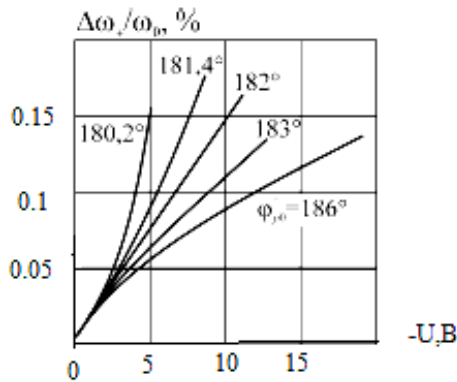


Рис. 8. Залежності нормованої смуги перебудови від напруги зсуву на варакторі при включенні його у варакторну секцію з короткозамикаючим поршнем ($Z_2 = 360$ Ом, $\beta_2 = 1,5$)

У результаті досліджень встановлено, що вибір необхідної смуги перебудови необхідно проводити з урахуванням величини власної добротності Q_0 . Для збільшення смуги перебудови необхідно застосування резонаторів з меншими величинами власної добротності Q_0 .

Таким чином, на основі аналізу еквівалентної схеми визначені загальні закономірності варакторної перебудови частоти високодобротних резонаторів. Отримані результати застосовні для розрахунків резонаторів різної геометрії з різними типами збуджуваних хвиль.

На підставі проведених досліджень для контролю зміни діелектричної проникності рідкого середовища, запропонований і досліджений квазіоптичний лейкосапфіровий напівдисковий резонатор, збуджуваний прямокутними щілинами зв'язку із твердотільними активними елементами. Порівняльний аналіз параметрів квазіоптичних і хвилеводних джерел НВЧ-випромінювання з тим самим напівпровідниковим діодом показав, що методи квазіоптики

дозволяють значно поліпшити спектральні характеристики твердотільних генераторів. Встановлено, що рівень частотних шумів діодних генераторів стабілізованих ДР на (35-40) дБ нижче, ніж у хвилеводних, крутість електронної перебудови становить (80-100) кГц/мА (коефіцієнт стабілізації ≈ 200), ширина спектральної лінії 0,25 кГц, у результаті чого досягнута короткочасна нестабільність частоти за 1 секунду $\square 1 \times 10^{-9}$. Рівень вихідної потужності становить 80 мВт, втрати потужності на стабілізацію 6 дБ.

У восьмому розділі «Експериментальні дослідження з мікробіологічними об'єктами тваринництва» проведена перевірка вірогідності теоретичних підходів і моделей, що описують процес впливу низькоінтенсивних акустичних коливань на мікрооб'єкти тварин у технологічному процесі їх кріоконсервації.

Для визначення вірогідності параметрів відкритого напівсферичного резонатора були проведені експериментальні дослідження, блок-схема експериментальної установки, за допомогою якої проведені дослідження з визначення ефективності збудження коливань TEM_{01q} у напівсферичному ВР й TM_{01q} у резонаторі з відрізком надрозмірного круглого хвилеводу, наведена на рис. 9.

У результаті експериментальних досліджень встановлено, що по мірі зменшення відстані між дзеркалами резонатора, дифракційні втрати зменшуються й η росте, досягаючи при $L/R < 0,4$ значення 0,96, Δl склало значення - 0,033 мм. При цьому, максимальну навантажену добротність у ВР напівсферичної геометрії має коливання TEM_{0112} ($L/R=0,669$, $Q_H=2820$), а величина η не досягає максимальної величини й становить 0,9.

У такій резонансній системі збуджується аксиально-симетричне коливання TM_{01q} . Довжина відрізка круглого хвилеводу $h = 3\lambda_x$. У цьому випадку максимальну добротність має тип коливань TM_{0116} ($L/R=0,559$, $Q_H=2170$).

Був проведений аналіз поведінки добротностей як у напівсферичному ВР, так і в резонаторі з відрізком надрозмірного круглого хвилеводу Експериментально встановлено, що максимальну добротність $Q_H=2820$ має коливання TEM_{0112} при $L/R=0,669$. Зменшення всіх видів добротностей при $L/R=0,505$ пов'язане із взаємодією досліджуваного коливання з одним з коливань резонансної системи (напівконфокальна геометрія резонансної системи). При $L/R < 0,7$ зв'язок резонатора з хвилеводним трактом сильний, тому в цьому випадку Q_H визначається добротністю зв'язку.

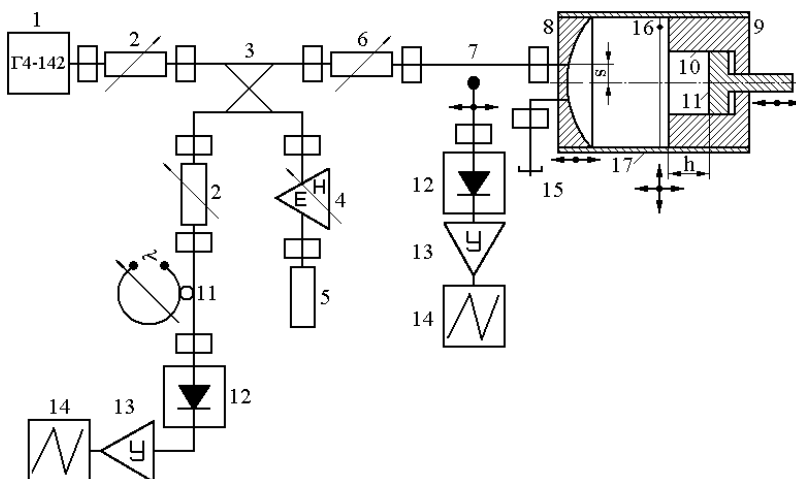


Рис. 9. Блок-схема експериментальної установки для дослідження ефективності збудження різних коливань у ВР за допомогою щілинного елемента зв'язку: 1 – високочастотний генератор сигналів; 2 – настановний атенуатор; 3 – направлений відгалужувач; 4 – погоджувач; 5 – навантаження; 6 – поляризаційний атенуатор; 7 – вимірювальна лінія; 8 – сферичне фокуруюче дзеркало; 9 – плоске дзеркало; 10 – відрізок надрозмірного круглого хвилеводу; 11 – резонансний хвилемір; 12 – кристалічний детектор; 13 – резонансний підсилювач; 14 – осцилограф; 15 – короткозамикаючий поршень; 16 – пробне тіло.

Проведені експериментальні дослідження збудження хвилі TM_{01} у круглому хвилеводі за допомогою коливання TEM_{01q} ВР з використанням генератора високочастотних сигналів Г4-142 через щілинний елемент зв'язку рис. 9, показують, що має місце збіг розрахунків і експерименту. Максимальна відмінність вимірюваного й обчисленого амплітудних розподілів полів коливання TEM_{0131} , якщо вважати вище рівня $1/e$ ($|E/E_{\max}|=0,368$), не перевищує 11%. Це говорить про правильний вибір діаметра вимірювального зонду.

У результаті вимірів амплітудного розподілу поля коливання (рис. 10) встановлено, що амплітудні розподіли поля цього коливання в площинах X (крива 1) і Y (крива 2) ідентичні, а також наведений розрахунковий розподіл інтенсивності поля цього коливання (крива 3), побудований по формулі $E \propto \exp(-\rho^2/w_0^2)$. Спостерігається збіг розрахунків і експерименту. Максимальна відмінність обчисленого й обмірюваного амплітудних розподілів поля коливання TEM_{0031} , якщо вважати вище рівня $1/e$, не перевищує 8 %.

Було розглянуто ВР, у якого в центрі плоского дзеркала розташований відрізок круглого хвилеводу, діаметр якого рівний 24 мм. Встановлено, що в діапазоні перебудови частоти генератора $f = 69 \div 79$ ГГц резонатор заданої геометрії володіє одночастотним відгуком. При цьому навантажена добротність резонатора склала $Q_H = 4120$.

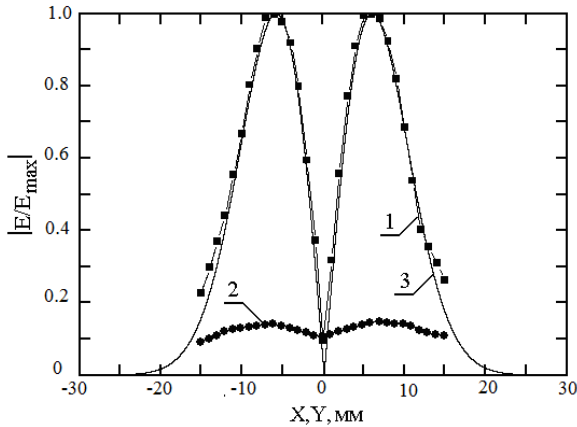


Рис. 10. Розподіл інтенсивності поля коливання TEM_{0131} у напівсферичному ВР, обмірюваний у двох взаємно перпендикулярних площинах

Результати досліджень для трьох діаметрів круглого хвилеводу, рівних 22 мм (крива 1), 24 мм (крива 2) і 26 мм (крива 3), наведені на рис. 11, доводять, що для всіх трьох діаметрів хвилеводів при зміні f_p спостерігаються мінімуми залежностей Γ_p від \tilde{a} . На підставі аналізу кривої 2, видно, що мінімальному значенню Γ_p відповідає $\tilde{a} = 1,480$. Якщо зрівняти це число з розрахунковим $\tilde{a} = 1,433$, то помітно, що відмінність не перевищує 4 %. Це дозволяє говорити про вірогідність виконаних теоретичних розрахунків.

Проведені дослідження показали, що в надрозмірному круглому хвилеводі при відповідній орієнтації збудливого елемента зв'язку дійсно збуджується хвиля TM_{01} , яка при наявності поршня приводить до перетворення коливання TEM_{01q} напівсферичного ВР в аксиально-симетричне коливання TE_{01q} . Це дозволяє говорити, що експериментально вдалося збудити у відкритій електродинамічній системі коливання «воляче око».

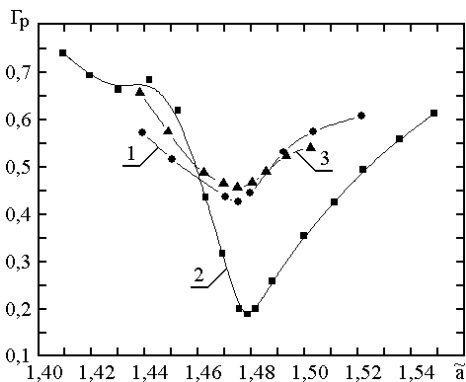


Рис. 11. Залежності коефіцієнтів відбиття Γ_p від нормованих радіусів круглого хвильоводу \tilde{a} при зміні частоти задаючого генератора

Результати експерименту показали можливість механічної перебудови частоти ($\approx 1\%$) стабілізованого генератора при переміщенні щілини зв'язку вздовж радіальної координати. В експерименті спостерігалися як режими слабкого зв'язку ($\beta < 1$), так і сильного зв'язку.

Результати експериментальних досліджень нестабільності частоти ГЛПД стабілізованого напівдисковим резонатором доводять, що довгочасна нестабільність частоти генератора склала за 1 с - 10^{-13} , а короткочасна за 10^{-3} с $\approx 5 \cdot 10^{-8}$.

На підставі отриманих результатів був створений генератор на діоді 2A757A з параметрами: вихідна частота генератора $74,2780 \pm 0,004$ ГГц; вихідна потужність генератора 50...60 мВт; діапазон перебудови частоти генератора 2%; заглушення побічних гармонік вихідного сигналу не менше 40 дБ; довгочасна нестабільність частоти генератора $5 \cdot 10^{-13}$ за 1 с. У процесі контролю за обробкою мікрооб'єктів тварин акустичними коливаннями нами був обраний метод виміру зсуву резонансної частоти ВР при поміщенні в його об'єм гнізд із різними зразками. Для цього використовувався метод порівняння.

Значення оптимальних параметрів низькоінтенсивних акустичних коливань (частота, потужність, експозиція), для впливу на гранули з мікрооб'єктами тварин перед їх кріоконсервацією, були визначені на основі багатофакторного експерименту, у якому в якості відгуку опромінених спермів була взята величина зсуву резонансної частоти вимірювального резонатора з мікрооб'єктами тварин у гранулах (діаметр 5 мм, висота 3 мм) відносно резонансної частоти (74,280 ГГц) опорного резонатора.

В експерименті було використано джерело акустичних коливань SMB-17CC з технічними характеристиками: діапазон частот 0,325 кГц – 2,250 кГц; діапазон

зміни потужності 50 дБ – 80 дБ; величина джерела живлення 1,5 – 15 В; величина струму живлення 0,2 – 1,4 мА.

Після проведення вимірів і розрахунків отримане рівняння регресії (58), це рівняння описує реальний процес, і, отже, дозволяє оцінити характер впливу кожного з трьох факторів на функцію відгуку. Крім того, стало можливим практичне використання отриманої моделі для прогнозування значення вихідного сигналу області варіювання параметрів X_i .

$$Y = 9,3 + 4,6x_1 + 2,5x_2 + 2,24x_3 + 4,4x_1x_2 + 5,4x_1x_3 + 2,4x_2x_3 + 4,4x_1^2 + 0,9x_2^2 + 3,4x_3^2, \quad (58)$$

де Y – різниця частот між вимірювальним і опорним резонаторами;

x_1 – частота акустичних коливань;

x_2 – потужність акустичних коливань;

x_3 – час опромінення мікрооб'єктів тварин.

Перевірка значимості коефіцієнтів регресії проводилася при рівні значимості $\alpha = 0,01 \cdot \frac{1}{2}$. Усі коефіцієнти в рівнянні (58) виявилися значимими.

У результаті чисельних обчислень, були отримані значення фактора в екстремальній точці $x_1 = -0,8$; $x_2 = 0,3$; $x_3 = 0,2$, що відповідає таким значенням натуральних параметрів: частота акустичних коливань 1 кГц, потужність 1,03 мкВт; час впливу на мікрооб'єкти тварин 320 с.

У лабораторному експерименті використовували гранули з 6 млн. сперміїв, які зазнали до кріоконсервації впливу акустичними коливаннями з параметрами: частота 1 кГц; потужність 1 мкВт; експозиція 320 с. У контролі гранули зі сперміями акустичними коливаннями не оброблялися. Після кріообробки й відтавання гранул проводили дослідження на оптико-електронній системі по визначенню живих сперміїв. Результати вимірів показали, що обробка гранул зі сперміями акустичними коливаннями приводить до збільшення товщини захисного шару на плазматичній мембрані й стійкості сперміїв до низьких температур. Відсоток виходу живих сперміїв у досліді склав близько 80 %, а в контролі всього 30 %.

Виробничі випробування з мікрооб'єктами ВРХ, опромінених акустичними коливаннями, були проведені в господарстві «Колос» Вовчанського району під керівництвом співробітників управління ветеринарної медицини цього району.

З аналізу отриманих даних випливає, що в досліді народилося на 57,7 % телят більше, ніж у контролі, а вага новонароджених телят у досліді перевершувала контрольних на 5...6 кг. Також встановлено, що час підняття на ноги в дослідній групі становив 24...26 хв., а в контрольній – 40...42 хв.

Важливим показником життєздатності новонароджених телят є зниження ваги перші 3...6 днів після народження. У ході експерименту було виявлено, що

втрати маси тіла на одне теля в перші 5 днів життя склали 1,5 % для дослідної групи й 5,8 % для контрольної. Фахівцями ветеринарної медицини були зареєстровані випадки хвороби телят кишково-шлунковими й легeneвими захворюваннями. Захворюваність телят у дослідній групі склала 10,2 %, а в контрольній 44 %. Смертність телят після 20 днів життя склала в контрольній групі 36,8 %, а в дослідній вижило 100 % телят.

У результаті виробничого експерименту було встановлено, що прибуток від упровадження акустичної технології в даному господарстві склала 57 тис. грн.

Виробничі випробування з ембріонами ВРХ, опроміненими акустичними коливаннями (частота 1 кГц, потужність 1 мкВт, експозиція 320 с), були проведені в Держплемгоспі «Двадцятий» Сахнівщинського району Харківської обл. під керівництвом співробітників управління ветеринарної медицини цього району.

Виробничий дослід з ембріонами тварин також показав, що вплив акустичних коливань на ембріони підвищує їхню стійкість до низьких температур і підвищує життєздатність отриманого потомства ВРХ.

У результаті виробничого експерименту з ембріонами було встановлено, що прибуток від упровадження акустичної технології в даному господарстві склав 35,7 тис. грн.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на підставі теоретичних і експериментальних досліджень створена низькоінтенсивна акустична технологія й електронна система по визначенню оптимальних параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин ВРХ (спермії, ембріони) перед їх кріоконсервацією з метою підвищення виходу життєздатних спермів після кріоконсервації, підвищення їх запліднюючої здатності й зниження кількості спермів у спермодозах для штучного запліднення.

1. На основі аналізу матеріалу вітчизняних і закордонних публікацій встановлено, що для збільшення виходу життєздатних сперматозоїдів після кріоконсервації й зменшення кількості спермів у спермодозах для запліднення тварин необхідно до кріоконсервації опромінювати спермодози низькоінтенсивними акустичними коливаннями.

2. На основі теоретичних досліджень встановлено, що для отримання товщини приграншарів на плазматичній мембрані мікрооб'єктів тварин (1,8 мкм для ембріонів і 0,4 мкм для спермів) необхідно створювати акустичними коливаннями в кріоконсервуючому середовищі швидкість мікропотоків 35,7 м/с для ембріонів і 33,4 м/с для спермів.

3. Доведено, що обробка акустичними коливаннями кріоконсервуючого середовища з мікрооб'єктами тварин (частота 0,98 кГц, потужність 1,07 мкВт, час обробки 307 с) приводить до збільшення у 10 разів товщини захисного шару

на плазматичній мембрані мікрооб'єктів у порівнянні з неопрацьованим середовищем.

4. Визначення оптимальних параметрів акустичних коливань для впливу на мікрооб'єкти тварин перед їх кріоконсервацією необхідно проводити по зміні ДП кріоконсервуючого середовища резонаторним способом з використанням розробленої установки на основі відкритих резонаторів, утворених сферичним і плоским дзеркалами, з параметрами: апертура дзеркал 60 мм; радіус кривизни сферичного дзеркала 110 мм; відношення $L/R=0,579$; відстань від осі дзеркал до щілин зв'язку 9,4 мм; резонансна частота 74,278 ГГц; навантажена добротність резонаторів $Q=4120$.

5. Надійне контролювання збільшення відносної діелектричної проникності кріоконсервуючого середовища з мікрооб'єктами тварин можливо для величини $\Delta\varepsilon$, що змінюється в межах $10^{-3} \leq \Delta\varepsilon \leq 5 \cdot 10^{-3}$, що відповідає зменшенню резонансної частоти вимірювального резонатора на величину Δf , що змінюється в межах $7,8 \text{ МГц} \leq \Delta f \leq 39 \text{ МГц}$.

6. Для додаткової селекції спектра коливань у резонаторі, у плоскому дзеркалі необхідно використовувати відрізок круглого хвилеводу з розмірами: діаметр хвилеводу 24 мм; довжина 12,268 мм; тип хвилі у хвилеводі TM_{01} .

7. Створення стабілізованого по частоті генератора на лавино-пролітному діоді для вимірювальної установки можливо на основі лейкосапфірового напівдискового резонатора з параметрами: діаметр 20 мм; товщина 2 мм; $\varepsilon_{\perp} = 9,4$; $\varepsilon_{\parallel} = 11,54$; $\tan \delta = 5 \cdot 10^{-5}$; добротність 20000.

8. В установці для визначення параметрів акустичних коливань необхідно використовувати генератор на діоді 2A757A з параметрами:

- вихідна частота генератора $74,2780 \pm 0,004$ ГГц;
- вихідна потужність генератора 50...60 мВт;
- діапазон перебудови частоти генератора 2 %;
- заглушення побічних гармонік вихідного сигналу не менше 40 дБ;
- довгочасна нестабільність частоти генератора $5 \cdot 10^{-13}$ за 1 с;

9. Підвищення виходу кількості спермів ВРХ після кріоконсервації до 80 %. Спермодози перед кріоконсервацією слід опромінювати низькоінтенсивними акустичними коливаннями з параметрами: частота 1 кГц; потужність 1 мкВт; експозиція 300...320 с.

10. Для отримання потомства телят ВРХ вагою 30...31 кг, виживаністю 100 % і використанням кількості життєздатних спермів у спермодозі 5...6 млн. шт. спермодози слід опромінювати перед кріоконсервацією низькоінтенсивними акустичними коливаннями з установленими параметрами. Прибуток від застосування акустичної технології складе 57 тис. грн. з розрахунку 20 корів.

11. Опромінення ембріонів перед кріоконсервацією акустичними коливаннями з параметрами: частота 1 кГц; потужність 1 мВт; експозиція 300 с, приводить до підвищення запліднюваності ВРХ на 25 % у порівнянні з контролем. Вживаність потомства в досліді становить 100 %, а в контролі 50 %. Прибуток від застосування акустичної технології склав 35,7 тис. грн. з розрахунку 12 корів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Кунденко Н. П. Особенности распространения ультразвука в биологической среде / Н. П. Кунденко // Вісник ТДАТУ. – Мелітополь, 2011. – Вип. 11. – Т. 4. - С. 181 – 186.

2. Кунденко Н. П. Теоретический анализ микропотоков при наличии акустических колебаний / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2011. – Вип. 58/2011.– С. 158 – 161.

3. Кунденко Н. П., Теоретическое обоснование влияния изменений диэлектрической проницаемости жидкой среды на частоту резонатора / Н. П. Кунденко, О. М. Мороз. // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2011. – Вип. 37/20112. – С. 47 – 55.

4. Кунденко Н. П. Анализ характеристик открытого резонатора для измерения диэлектрической проницаемости жидких биологических веществ / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2011. – Вип. 26/2012.– С. 50 – 55.

5. Кунденко Н. П. Анализ резонансных систем для измерения электрофизических параметров веществ / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит.– 2012. – №03/97. – С. 56 – 62.

6. Кунденко Н. П. Анализ методов построения источников КВЧ излучения с высокой стабильностью их частоты / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №2/8 (56). – С. 18 – 22.

7. Кунденко Н. П., Исследование открытой резонансной системы с отрезком круглого волновода / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. - №3/5 (57). – С. 10-13.

8. Кунденко Н. П. Расчет колебательной скорости и звукового давления в окрестности границы биологического объекта / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №5/5 (56). – С. 29 – 32.

9. Кунденко Н. П. Расчет скорости микропотока у поверхности шара, моделирующего эмбрион / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №1/4 (55). – С. 66 – 68.

10. Кунденко Н. П. Определение параметров перестройки частоты полудискового диэлектрического резонатора / Н. П. Кунденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №4/9 (58). – С. 29 – 32.
11. Кунденко Н. П. Разработка и исследования генераторов на лавинно-пролётные диодах / Н. П. Кунденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №07/101. – С. 66 – 70.
12. Кунденко Н. П. Застосування акустичних полів в сільському господарстві / Н. П. Кунденко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2010. – Вип. 102. – С. 123 – 124.
13. Кунденко Н. П. Алгоритм расчета диффузного потока к поверхности сфероида, моделирующего спермий / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип. 18/2012. – С. 137 – 141.
14. Кунденко Н. П. Анализ характеристик открытого резонатора для измерения диэлектрической проницаемости жидких биологических веществ / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип. 26/2012. – С. 50 – 55.
15. Кунденко Н. П. Алгоритм расчета диффузного потока к поверхности сфероида, моделирующего спермий / Н. П. Кунденко, А. Д. Черенков // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2011. – Вип. 9/2012. – С. 91 – 95.
16. Кунденко Н. П. Расчет эффективного коэффициента вязкости криоконсервирующей среды с биологическими объектами / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип. 1/2012. – С. 125 – 127.
17. Кунденко Н. П. Исследования криоконсервации микрообъектов крупного рогатого скота / Н. П. Кунденко // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип. 34/2012. – С. 156 – 160.
18. Кунденко Н. П. Расчеты колебательной скорости в криоконсервируемой среде / Н. П. Кунденко, В. С. Лупиков // Вісник національного технічного університету "ХПІ". – Харків, 2012. – Вип. 3/2012. – С. 120 – 125.
19. Кунденко Н. П. Анализ системы контроля за обработкой микрообъектов животных акустическими колебаниям / Н. П. Кунденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №08/102. – С. 64 – 68.
20. Кунденко Н. П. Исследование оптического резонатора в отрезке круглого волновода / Н. П. Кунденко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2012. – Вип. 130. – С. 106 – 108.
21. Кунденко Н. П. Определение добротности открытой резонансной системы в режиме слабой связи / Н. П. Кунденко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2012. – №11/105. – С. 66 – 71.

22. Кунденко Н. П. Математическое моделирование процесса воздействия акустического поля на криоконсервирующую среду с биологическим объектом: матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України" (20 - 21 жовтня 2011 р.) / Н. П. Кунденко // М-во аграрної політики та продовольства України. - Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка. – 2011. – Вип. 117. – С. 140 – 142.

23. Кунденко Н. П. Акустическая технология в технологическом процессе воспроизводства животных: матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Актуальні питання енергетики і прикладної біофізики в агропромисловості" (3-5 травня 2012 р.) / Н. П. Кунденко // М-во аграрної політики та продовольства України. - Мелітополь: ТДАТУ. – 2012. – Вип. 2. – Т. 1. – С. 232 – 240

24. Кунденко Н. П. Теоретические исследования оптического резонатора в отрезке круглого волновода: матеріали XI міжнародної науково-технічної конференції "Вібрації в техніці та технологіях" (23-25 квітня 2012 р.) / Н. П. Кунденко // М-во освіти і науки, молоді та спорту України. - Полтава: ПНТУ ім. Ю. Кондратюка. – 2012. - Вип. 2/32. – С. 132 – 138.

Анотація

Кунденко М.П. Молекулярна акустична технологія та електронні системи контролю в технологічному процесі відтворення тварин. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за фахом 05.11.17 – біологічні та медичинські пристрої та системи. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. – Харків, 2012.

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна проблема зі створення низькоінтенсивної акустичної технологія і електронної систем контролю з визначенням оптимальних параметрів акустичних коливань для дії на мікрооб'єкти тварин ВРХ (спермії, ембріони) перед їх криоконсервацией з метою підвищення виходу життєздатних сперміїв після криоконсервації, підвищення їх здатності, що запліднення, і зниження кількості сперміїв в спермодозах для штучного запліднення.

В результаті теоретичних досліджень впливу акустичного поля на мікрооб'єкти тварин запропонована математична модель масопередачі в структурі криоконсервуючого середовища та визначені параметри джерела низькоінтенсивних акустичних коливань. Розроблена установка на основі відкритих резонаторів, з сферичними та плоскими дзеркалами та лайкосапфирового напівдискового резонатора для визначення зміни діелектричної проникненості криоконсервуючого середовища.

Проведені експериментальні дослідження підтвердили достовірність отриманих теоретичних моделей, а також було встановлено, що вплив акустичних коливань призводить не тільки до підвищення виходу кількості спермій ВРХ після криоконсервації, але і до збільшення виживання молодяку тварин.

Ключові слова: акустичні коливання, резонансна система, дієлькометрія, криоконсервація, діелектрична проникненість.

Аннотация

Кунденко Н.П. Молекулярная акустическая технология и электронные системы контроля в технологическом процессе воспроизводства животных. . – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.17 – биологические и медицинские устройства и системы. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенка. – Харьков, 2012.

В диссертационной работе на основании теоретических и экспериментальных исследований создана низкоинтенсивная акустическая технология и электронная система по определению оптимальных параметров акустических колебаний для воздействия на микрообъекты животных КРС (спермии, эмбрионы) перед их криоконсервацией с целью повышения выхода жизнеспособных спермиев после криоконсервации, повышения их оплодотворяющей способности и снижения количества спермиев в спермодозах для искусственного осеменения

На основе теоретических исследований установлено, что для получения толщины погранслоёв на плазматической мембране микрообъектов животных, 1,8 мкм для эмбрионов и 0,4 мкм для спермиев, необходимо создавать акустическими колебаниями в криоконсервирующей среде скорость микропотоков 35,7 м/с для эмбрионов и 33,4 м/с для спермиев, при обработке акустическими колебаниями криоконсервирующей среды с микрообъектами животных (частота 0,98 кГц, мощность 1,07 мкВт, время обработки 307 с) приводит к увеличению до 10 раз толщину защитного слоя на плазматической мембране микрообъектов по сравнению с необработанной средой.

В результате теоретических и экспериментальных исследований определены оптимальные параметры акустических колебаний для воздействия на микрообъекты животных перед их криоконсервацией разработан на основе лейкосапфировый полудисковый резонатор с параметрами: диаметр 20 мм; толщина 2 мм; $\varepsilon_{\perp} = 9,4$; $\varepsilon_{\parallel} = 11,54$; $\tan \delta = 5 \cdot 10^{-5}$; добротность 20000, стабилизированный по частоте генератор на лавинно-пролетном диоде.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили достоверность полученных теоретических моделей, а также было установлено, что для получения потомства телят КРС весом 30...31 кг, выживаемостью 100 % и использованием количества жизнеспособных спермиев в спермодозе 5...6 млн. шт спермодозы следует облучать перед криоконсервацией низкоинтенсивными акустическими колебаниями с установленными параметрами. Прибыль от применения акустической технологии составит 57 тыс. грн. из расчета 20 коров.

Экспериментальное исследование по облучению эмбрионов перед криоконсервацией акустическим колебаниями с параметрами: частота 1 кГц; мощность 1 мкВт; экспозиция 300 с, приводит к повышению оплодотворяемости КРС на 25 % по сравнению с контролем. Выживаемость потомства в опыте составляет 100 %, а в контроле 50 %. Прибыль от применения акустической технологии составила 35,7 тыс. грн. из расчета 12 коров.

Ключевые слова: акустические колебания, резонансная система, диелькометрия, криоконсервация, диэлектрическая проницаемость.

Abstract

Kundenko M. P. . Molecular acoustic technology and electronic control system in technological process of reproduction of animals. – The Manuscript.

Dissertation for Doctor of Engineering degree in the specialty 05.11.17 – biological and medical devices and systems. – Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasilenko. – Kharkov.2012.

In thesis work solved scientific and technical challenge of creating low-frequency acoustic technology and electronic monitoring systems with the definition of optimal parameters of acoustic vibrations for action on animal micro objects KRS (spermium, embryos) before their cryopreservation in order to increase the viable spermium after cryopreservation, to enhance their capacity, fertilization, and reduce the number of spermium in spermatozoon for artificial insemination.

As a result of theoretical research of influence of an acoustic field on micro objects animals mathematical mass transfer model proposed in the structure of the cryopreserve and low intensity source options defined acoustic vibrations.

Developed based on the installation of open resonators with spherical and flat mirrors and leucosapphires semi-circular resonator for determining changes in dielectric permeability cryopreservation environment.

Conducted experimental studies have confirmed the reliability of the obtained theoretical models, and it was found that the impact of acoustic fluctuations leads not only to increase the number of cattle spermium after cryopreservation, but also to increase the survival of young animals.

Keywords: acoustic oscillations, resonance system, insulator-metry, cryopreservation, permeate dielectric.

Підписано до друку 10.12.2012 р. Формат паперу 60×90 1/16.
Умов. друк. Арк. 0,9. Папір офсетний. Наклад 100 прим.
Друк РІЗО.

КП "Міська друкарня", м. Харків, 61002, вул. Артема, 44.
Свідотство про державну реєстрацію серія ДК, № 3613,
Від 29.10.2009.

