

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка

**Харченко Сергій Олександрович**

УДК 631.362.3

**КОНЦЕПЦІЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСІВ  
ВІБРОРЕШІТНОГО ПРОСІЮВАННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ**

05.05.11 – Машини і засоби  
механізації сільськогосподарського виробництва

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** академік НААН України,  
доктор технічних наук, професор  
**Гіщенко Леонід Миколайович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Дідух Володимир Федорович**,  
Луцький національний технічний університет,  
професор кафедри інженерного та комп'ютерного  
забезпечення агропромислового комплексу;

доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Шейченко Віктор Олександрович**,  
Полтавська державна аграрна академія,  
професор кафедри технологій та засобів механізації  
аграрного виробництва;

доктор технічних наук, доцент  
**Михайлов Євген Володимирович**,  
Таврійський державний агротехнологічний університет,  
професор кафедри машиновикористання в землеробстві.

Захист відбудеться «23» березня 2018 р. о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.832.04 в Харківському національному технічному університеті сільського господарства імені Петра Василенка за адресою: 61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44.

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

Автореферат розісланий «21» лютого 2018 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.І. Калінін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Заплановане збільшення виробництва зерна в Україні, підготовка необхідного обсягу якісного насіння зернових потребує більше 50 тис. од. зерноочисних машин при їх фактичній наявності близько 50%, більшість з яких відпрацювала амортизаційні строки. Визначальними в технологічних процесах зерноочисних машин, серед яких решітні вібраційні сепаратори є найпоширеніші, є процеси просіювання (ПП) зернових сумішей (ЗС) через отвори віброрешіт. Але решітне просіювання ЗС гречки, кукурудзи та зернобобових культур на серійних вібраційних сепараторах вивчене недостатньо та не в повній мірі задовольняє зростаючі вимоги виробництва.

Комплексною оцінкою досліджень вчених встановлено відсутність системного підходу щодо інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання ЗС. Розглянуті ПП ЗС на віброрешетах мають спрощені математичні моделі щодо врахування параметрів отворів та застосування активаторів. Подальше використання гідроаналогії, під час математичного моделювання динамічних процесів руху псевдозрідженої ЗС по віброрешетах, стримане відсутністю сукупного урахування властивостей ЗС, зокрема неоднорідності, параметрів отворів та їх розташування на віброрешетах, що призводить до не раціонального обґрунтування параметрів ПП.

Таким чином, розробка науково-обґрунтованої концепції інтенсифікації ПП ЗС на віброрешетах із застосуванням активаторів є актуальним напрямком, вирішення якого забезпечить підвищення продуктивності зернових сепараторів та сталу продовольчу безпеку України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до: НДР, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологічнобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насінневих матеріалів» (ДР 0116 U 004624, 2016 – 2017 р.р.); комплексної державної цільової програми «Зерно України – 2008 – 2015»; державної цільової програми «Розвиток українського села до 2015 р.»; регіональних програм «Стратегія сталого розвитку Харківської області до 2020 року», «Найважливіші проблеми АПК на період до 2015 р.»; комплексних тем наукових досліджень з ПАТ «Завод імені Фрунзе» м. Харків «Підвищення ефективності роботи зернових сепараторів при розділенні насіння с. г. культур» (договори № 12/1 від 24.12.2012 р., №2/1 від 20.01.2016 р.), з СВТП «Механік» м. Житомир «Підвищення ефективності процесів зернових сепараторів» (договір №14/1 від 24.11.2015 р.); науково-дослідної роботи: «Динаміка процесів просіювання зернових сумішей» (ДР № 0115 U 002721, 2015 –2016 р.р.).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення продуктивності віброрешітного просіювання зерна шляхом системного підходу до обґрунтування та розробки нових методів і засобів активізації процесу розділення компонентів ЗС.

*Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:*

– комплексна оцінка і системний аналіз існуючих підходів до розв'язання проблеми підвищення ефективності віброрешітного просіювання ЗС;

– обґрунтувати принципи, розробити концепцію інтенсифікації ПП ЗС з урахуванням властивостей ЗС, параметрів отворів та їх розташування на віброрешеті;

– за методом подібності виконати моделювання динаміки ЗС за гідродинамічними аналогіями, обґрунтувати рекомендації використання бульбашкового псевдозрідженого середовища (БПС), що враховує неоднорідність ЗС;

– виконати оцінку впливу конструктивно-кінематичних параметрів плоских та циліндричних віброрешіт з активаторами на поле швидкості БПС;

– дослідити вплив властивостей БПС на ПП з урахуванням коефіцієнта динамічної в'язкості, коефіцієнта сухого тертя, коефіцієнтів форм насінин і завантаження;

– обґрунтувати підхід і розробити метод оцінки за модульним принципом функціональних залежностей складових швидкості БПС з періодично-структурними, кінематичними параметрами плоского та циліндричного віброрешіт, що визначають ефективність ПП ЗС;

– провести оцінку впливу параметрів активаторів, технологічних показників ПП та властивостей ЗС на надійність віброрешіт;

– обґрунтувати критерії оптимізації ПП, запропонувати цільову функцію та визначити раціональні конструктивні параметри об'ємних та епіциклоїдних активаторів віброрешіт;

– провести ідентифікацію динамічних параметрів ЗС та розмірних характеристик їх компонентів, виконати оцінку адекватності та ефективності розроблених математичних моделей ПП ЗС експериментальними дослідженнями та виробничими випробуваннями плоских та циліндричних віброрешіт з активаторами.

**Об'єкт дослідження:** процеси віброрешітного просіювання ЗС, які потребують інтенсифікації параметрів їх руху.

**Предмет дослідження:** динамічні процеси ЗС на плоских та циліндричних віброрешетах, їх інтенсифікація та обґрунтування параметрів активаторів просіювання.

**Методи дослідження.** Методологічною основою роботи є використання системного підходу під час досліджень. Теоретичні дослідження проведено на базі положень механіки, статистичної фізики, гідродинаміки. При побудові математичних моделей динаміки ЗС під час їх просіювання через отвори плоских та циліндричних віброрешіт використано методи розв'язання лінійних і нелінійних диференціальних рівнянь. Моделювання ПП ЗС проведено шляхом комплексного аналізу систем диференційних рівнянь механіки з використанням: перетворень Лапласа, методу розділення змінних, методу лишків, методу послідовних наближень, методу Рімана-Гільберта. Чисельне моделювання інтенсифікації ПП проведено з застосуванням автоматизованих обчислювальних систем: MatLab 7.0, Pro/engineer Wildfire 4.0, Matematica 5.0, OriginPro 9.1, Visual Fortran 6.6. Під час експериментальних досліджень ПП ЗС застосовано як розроблені, так і установлені відповідними діючими закордонними і державними стандартами, методи натурних випробувань, статистики та імітаційного моделювання.

### **Наукова новизна одержаних результатів:** *Вперше:*

– для керування та розрахунку технологічних показників зернових сепараторів запропоновано концепцію інтенсифікації ПП ЗС через отвори віброрешіт з об'ємними та епіциклоїдними активаторами, яка відрізняється від існуючих використанням фізичної моделі бульбашкової псевдорідини і методів гідродинаміки багатофазних систем;

– встановлено поле швидкості ЗС при просіюванні на плоских та циліндричних віброрешетах, яке дозволяє враховувати вплив параметрів об'ємних та епіциклоїдних активаторів за допомогою розроблених дво- та тривимірних нелінійних гідродинамічних моделей бульбашкових псевдорідин;

– встановлено функціональні залежності складових швидкості ЗС з періодично-структурними, кінематичними параметрами плоского та циліндричного віброрешіт з активаторами, які визначають продуктивність та якість ПП на зернових сепараторах;

– встановлено раціональні конструктивні параметри об'ємних та епіциклоїдних активаторів за критеріями оптимізації ПП від параметрів віброрешіт, а також гідродинамічних і фізико-механічних характеристик ЗС.

### *Отримали подальший розвиток:*

– науковий напрям моделювання динаміки ЗС з використанням ефективного коефіцієнта в'язкості, який відрізняється від існуючих врахуванням властивостей бульбашкових псевдозріджених середовищ;

– встановлення закономірностей змін еквівалентних напружень та довговічності віброрешіт за методом скінченних елементів на основі програмного продукту Pro/ENGINEER, які враховують технологічні показники ПП, властивості ЗС і конструктивні параметри активаторів.

### *Удосконалено:*

– метод визначення програмованої ефективності ПП, який доповнено врахуванням варіювання форм частинок ЗС та параметрів розроблених віброрешіт з активаторами.

**Практичне значення одержаних результатів.** За результатами досліджень комплексно обґрунтовано раціональні параметри розроблених плоских та циліндричних віброрешіт з активаторами, які підвищують технологічні показники продуктивності та якості роботи зернових сепараторів. Запропоновано засоби інтенсифікації ПП ЗС, які є складовою концепції, та підтверджені патентами. Віброрешета з об'ємними та епіциклоїдними активаторами просіювання апробовано у виробничих умовах при очищенні ЗС гречки, кукурудзи та зернобобових культур.

На СВК НПП «Росія» (Київська обл.) з 2012 р. випробувано і впроваджено циліндричні решета з трипелюстковими епіциклоїдними активаторами (ТЕА) на вібровідцентровому сепараторі Р8-БЦСМ-50 з річним економічним ефектом 31,2 тис. грн.

На НДП «Центральне» ХНТУСГ (Харківська обл.) з 2011 р. випробувано і впроваджено циліндричні та плоскі решета з ТЕА, п'ятипелюстковими

епіциклоїдними активаторами (ПЕА) на вібраційних сепараторах СВС-25, Petkus K 218, ОС-4,5 з річним економічним ефектом 130,5 тис. грн.

На Шевченківському відділенні ТОВ «Гутиянський елеватор» (Харківська обл.) з 2013 р. випробувано і впроваджено циліндричні решета з прямокутними об'ємними активаторами (ПОА) на вібровідцентровому сепараторі Р8-БЦСМ-50 з річним економічним ефектом 24,6 тис. грн.

Системним аналізом залежностей критеріїв оптимізації ПП від конструктивно-кінематичних параметрів віброрешіт та фізико-механічних характеристик ЗС, визначено раціональні параметри активаторів. Їх виробнича перевірка підтвердила підвищення продуктивності сепараторів, що дозволило впровадити їх у серійне виробництво.

На ПАТ «Завод імені Фрунзе» (м. Харків) з 2014 р. впроваджено у серійне виробництво плоскі та циліндричні решета: з ПЕА для розділення ЗС зернобобових культур з річним економічним ефектом 86 тис. грн, при річній програмі випуску 9 тис. шт.; з ТЕА для розділення ЗС гречки з річним економічним ефектом 105 тис. грн, при річній програмі випуску 11 тис. шт.; з ПОА для розділення ЗС кукурудзи з річним економічним ефектом 144 тис. грн, при річній програмі випуску 15 тис. шт. Розроблені решета з активаторами пройшли виробничу апробацію на підприємствах України, Австрії та Естонії.

На СВТП «Механік» (м. Житомир) з 2014 р. впроваджено комплектування вібровідцентрових сепараторів новими розробленими решетами з активаторами. Відповідно до програми випуску сепараторів загальний річний економічний ефект становить 1,02 млн. грн.

Застосування розроблених віброрешіт підвищує продуктивність сепараторів: на 25...55 % при розділенні ЗС гречки на решетах з ТЕА; на 23,8...95 % – ЗС зернобобових культур на решетах з ПЕА; на 30...35 % – ЗС кукурудзи на решетах з ПОА.

**Особистий внесок здобувача.** Теоретичні та експериментальні результати досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно та викладено у роботах [1 – 54]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: [1, 2, 6, 22, 47 – 49], де визначено напрямки і способи інтенсифікації ПП ЗС; [15, 16, 25, 32, 35], в яких обґрунтовано способи вирішення завдань і складено динамічні моделі ПП; [4, 13, 26], де наведено обґрунтування й розв'язання крайової задачі динаміки БПС на плоских віброрешетах з активаторами; [19, 20, 28], в яких проведено математичне моделювання ПП ЗС на циліндричних віброрешетах; [5, 7, 8], в яких реалізовано методики ідентифікації властивостей ЗС; [10, 21, 23, 31, 50 – 54], де запропоновано методики експериментальних досліджень і проведено обробку результатів.

У отриманих патентах [39 – 46] наведено розроблені способи і технічні засоби інтенсифікації ПП ЗС.

У монографіях [1 – 4] приймав участь у розділах, де наведено засоби інтенсифікації та обґрунтування параметрів ПП ЗС на віброрешетах.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи доповідалися,

обговорювалися та отримали позитивні відгуки на: IX, XI міжнародних науково-практичних конференціях (МНПК) «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (КНТУ, м. Кіровоград, 2013 р., 2017 р.); на XII, XIII, XVI МНПК «Вібрації в техніці та технологіях» (ХНТУСГ, м. Харків, 2013 р.; ВНАУ, м. Вінниця, 2014 р.; ВНТУ, м. Вінниця, 2017 р.); на XIII, XVII МНПК «Сучасні проблеми землеробської механіки» (ВНАУ, м. Вінниця, 2012 р.; СНАУ, м. Суми, 2016 р.); на МНПК «Землеробська механіка на рубежі сторіччя» (ТДАТУ, м. Мелітополь, 2014 р.); на щорічних конференціях і МНПК «Технічний прогрес в АПК», «Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин», «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (ХНТУСГ, м. Харків, 2006 – 2017 рр.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 54 наукових працях, у тому числі: 4 монографіях; 20 статтях у спеціалізованих наукових виданнях України (з них 6 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз); 8 публікаціях у закордонних виданнях; 6 тезах у збірниках доповідей наукових конференцій; отримано 8 патентів.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 516 сторінок, у тому числі 12 додатків на 166 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 322 сторінки, містить 152 рисунки, 25 таблиць. Список використаних джерел нараховує 288 найменувань на 27 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито сутність і стан наукової проблеми, її значущість, обґрунтовано актуальність теми та необхідність проведення досліджень, сформульовано мету і основні завдання дослідження, наведено наукову новизну одержаних результатів.

**У першому розділі** виконано системний аналіз стану проблеми, наведено огляд світових досліджень, класифікацію перспективних способів і засобів підвищення ефективності ПП ЗС, які виконані в лабораторії вібраційних зерноочисних машин ХНТУСГ.

Продуктивність зернових решітних сепараторів знижена на коефіцієнт еквівалентної продуктивності: 0,55...0,7 – при розділенні ЗС гречки; 0,8...0,9 – гороху; 0,6...0,9 – сояшнику та кукурудзи, порівняно з пшеницею. Це пояснюється особливістю форм насіння та їх відмінністю з отворами решета, що підтверджує потенціальну можливість підвищення ефективності ПП ЗС через отвори віброрешіт за прийнятим новим науковим напрямом їх інтенсифікації.

Наукові дослідження проблем підвищення ефективності розділення ЗС за різними ознаками виконані: на плоских решетах В.В. Гортинським, В.М. Цециновським, П.М. Заїкою, С.А. Васильєвим, Г.Є. Листопадом, М.М. Захаровим, В.О. Шейченком, Р.З. Кацевою, О.Н. Зюліним, М.В. Бакумом, Є.В. Михайловим, А.В. Міняйлом та ін.; на решетах у вигляді поверхні обертання: А.Г. Шуляковим, В.Р. Тороповим, Н.А. Архангельським, В.Н. Степановим, Н.Є. Авдєєвим, А.В. Бариллом, Я.І. Лейкіним, Є.С. Гончаровим, Л.М. Тіщенком;

В.П. Ольшанським, Б.І. Котвим, В.Ф. Дідухом, О.І. Завгороднім, Г.Д. Терсковим, Д.І. Мазоренком, П.А. Мироновим та ін.

При цьому, для опису динамічних процесів сепарації та просіювання сипких середовищ, використовували: І.І. Блехман, Б.А. Берг, П.М. Василенко та інші вчені – аналогії з переміщенням матеріальної частинки; В.В. Гортинський – аналогії переміщення ЗС як руху поширюваного сипкого тіла; П.М. Заїка та інші – теорії вібраційного переміщення, сегрегації насіння в шарі, просіювання насіння через отвори решіт та їх очищення; Г.Є. Листопад, Л.М. Тіщенко, В.П. Ольшанський та інші – аналогії з моделями гідродинаміки. Вченими Р.М. Рогатинським, А.С. Кушнар'ювим досліджено проблеми процесів передачі енергії в суцільне середовище. Гідродинамічні моделі довели свою адекватність при моделюванні динаміки ЗС по віброрешетках. Разом з тим, ці дослідження не мають системного і комплексного характеру, тому що у сукупності та з єдиних позицій не розглядається динаміка ЗС, які є багатозональними і неоднорідними, та не враховуються параметри отворів віброрешіт. Крім того, розроблені математичні моделі не дають можливості враховувати наявність активаторів просіювання ЗС. Таким чином, пропонується вирішення проблеми шляхом розробки концепції інтенсифікації ПП ЗС, яка дозволить керувати підвищенням ефективності та розраховувати технологічні показники цих процесів.

**У другому розділі** проведено математичне моделювання динаміки ЗС на структурних плоских віброрешетках зернових сепараторів.

На підставі методів механіки суцільних середовищ побудовано математичні моделі, за допомогою яких досліджено основні динамічні й кінематичні характеристики руху псевдозрідженого зернового шару по нахиленому плоскому віброрешету, яке здійснює гармонійні коливання в своїй площині. Динаміка ЗС моделюється як рух псевдорідини, яка містить бульбашки газоподібного середовища та представляє собою БПС.

Динаміка БПС по нахиленому віброрешету моделюється як рух в'язкої нестисливої рідини, швидкість якої задовольняє нелінійним рівнянням Нав'є – Стокса. Віброрешето розглядається як періодична структура з періодом, що визначається розташуванням отворів.

Розв'язання нелінійних рівнянь Нав'є-Стокса, яке задовольняє крайові умови, побудовано методом послідовних наближень. Для розв'язку використано перетворення Лапласа за часом, метод задачі Рімана-Гільберта. Рівняння другого наближення, після усереднення за часом, зведено до неоднорідного рівняння Пуассона. Це рівняння руху шару БПС під дією зовнішніх об'ємних сил – середньої за часом об'ємної сили, яка визначається з розв'язку рівняння першого наближення. Це рішення описує поле швидкості стаціонарних потоків, які виникають у шарі БПС.

Введена декартова система координат  $x_1, x_2, x_3$  (рис.1), при якій перфорована поверхня віброрешета співпадає з площиною  $x_1, x_3$ , і представляє собою періодичну структуру з періодом  $l$ , що визначається взаємним розташуванням отворів з усередненим діаметром  $d$ . Шар БПС товщиною  $h$  рухається по плоскому структурному віброрешету, яке нахилене до горизонту під кутом  $\theta$  і здійснює



вздовж осі  $x_1$  гармонійні коливання з амплітудою  $A$  і коловою частотою  $\omega$ . Під їх дією шар БПС знаходиться у псевдозрідженому стані.

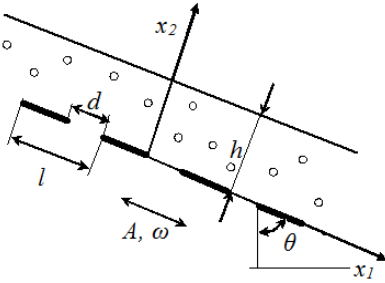


Рисунок 1 – Схема руху БПС по нахиленому плоскому віброрешету

Для визначення поля швидкості  $\vec{U}$  і надлишкового тиску  $P$  БПС прийнято систему рівнянь у ейлеревих координатах:

$$\rho \frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \rho (\vec{U}, \nabla) \vec{U} = -\nabla P + \mu \Delta \vec{U} + \rho \vec{g}, \quad (1)$$

$$\operatorname{div} \vec{U} = 0, \quad (2)$$

де  $\rho$  – усереднена щільність БПС;  
 $\vec{g}$  – прискорення вільного падіння.

Для визначення впливу властивостей БПС на ПП досліджено змінність коефіцієнта динамічної в'язкості.

Ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості БПС  $\mu$  визначали за виразом:

$$\mu = \frac{a^2 (\rho + 2\rho_p) \omega C}{9(\bar{y} - a) B_1} \left( 1 + \delta_{\Pi} \frac{2,5\mu_{\Pi} + \left( \frac{a^2 (\rho + 2\rho_p) \omega C}{9(\bar{y} - a) B_1} \right)}{\mu_{\Pi} + \frac{a^2 (\rho + 2\rho_p) \omega C}{9(\bar{y} - a) B_1}} \right), \quad (3)$$

де  $\mu_{\Pi}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості газоподібного середовища бульбашок (область між твердими частинками ЗС);  $\delta_{\Pi}$  – коефіцієнт об'ємної концентрації бульбашок;  $C = \left( \frac{2(\rho_p - \rho) A \omega^2}{\pi} \right) - \sqrt{\left( \frac{2(\rho_p - \rho) A \omega^2}{\pi} \right)^2 - D^2}$ ;

$$B_1 = (3\xi f g \pi \rho \cos \theta) / 4a; \quad \bar{y} = h - \frac{4a\rho_p \operatorname{tg} \theta}{3\xi f \rho \pi}; \quad D = \frac{3\xi f \rho \pi y \cos \theta (h - a)}{4a} - \rho_p g \sin \theta;$$

$\xi$  – коефіцієнт, яким враховано пористість БПС;  $f$  – коефіцієнт внутрішнього сухого тертя;  $a = k_f a^*$  і  $\rho_p$  – усереднені радіус і щільність частинки ЗС, відповідно;  $k_f$ ,  $a^*$  – коефіцієнт форми і дійсний радіус частинки ЗС, відповідно;  $y$  – координата за товщиною шару БПС.

Приймаємо крайові та граничні умови:

– поле швидкості та надлишковий тиск не залежать від просторової змінної  $x_3$ ;

– при  $x_2 = h$ :  $P|_{x_2=h} = 0$ ,  $\frac{\partial U_1}{\partial x_1} = \frac{\partial U_2}{\partial x_2}|_{x_2=h} = 0$ ,  $\left( \frac{\partial U_1}{\partial x_2} + \frac{\partial U_2}{\partial x_1} \right)|_{x_2=h} = 0$ ;

– нормальна до площини решета компонента швидкості на отворах:  $U_2|_{x_2=0} = V_0$ ,

де  $V_0$  – середня швидкість проходження БПС через отвори решіт;

– на частині решета без отворів дотична компонента швидкості:  $U_1|_{x_2=0} = A\omega \sin \omega t$ .

Застосовуємо метод послідовних наближень при виконанні нерівності:  $Re \ll U_0 / \sqrt{2\nu\omega}$ , де  $U_0$  – характерний масштаб коливальної швидкості БПС,  $Re = A\omega l / \nu$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – усереднений ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості БПС.

Тоді тиск і швидкість БПС при розкладанні в ряди має вигляд:

$$\begin{aligned} P &= P_0 + P_1 + P_2 + \dots, \\ \vec{U} &= \vec{U}_0 + \vec{U}_1 + \vec{U}_2 + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

де значення індексу визначає порядок малості відповідної величини.

В нульовому наближенні тиск та компоненти швидкості БПС:

$$P_0 = \rho g \cos \theta (h - x_2), \quad U_{01} = \frac{g \sin \theta}{2\nu} [h^2 - (h - x_2)^2], \quad U_{02} = 0. \quad (5)$$

Для розв'язання крайової задачі у першому наближенні використано перетворення Лапласа за часом. Отримані парні суматорні рівняння, які за методом задачі Рімана-Гільберта зведено до нескінченної системи лінійних алгебричних рівнянь другого роду відносно коефіцієнтів розкладання в ряди Фур'є компонент поля швидкості.

В результаті отримані остаточні рівняння поля швидкості першого наближення ( $U_{11}, U_{12}$ ) БПС (рис.2):

$$\begin{aligned} U_{11} &= A\omega \sqrt{\frac{\cos^2(\lambda(h-x_2)) + \text{sh}^2(\lambda(h-x_2))}{\cos^2(\lambda h) + \text{sh}^2(\lambda h)}} \sin(\omega t + \Phi - \psi) - \\ &- 2V_0 \sum_{n=1}^{\infty} (P_{n-1}(U) - P_n(U)) e^{-\frac{2\pi n}{l} h} \text{sh}\left(\frac{2\pi n}{l}(h-x_2)\right) \sin\left(\frac{2\pi n}{l} x_1\right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$U_{12} = 2V_0 \sum_{n=1}^{\infty} (P_{n-1}(U) - P_n(U)) e^{-\frac{2\pi n}{l} h} \text{ch}\left(\frac{2\pi n}{l}(h-x_2)\right) \cos\left(\frac{2\pi n}{l} x_1\right),$$

де  $\Phi = \arctg(\text{tg}(\lambda(h-x_2))\text{th}(\lambda(h-x_2)))$ ;  $\psi = \arctg(\text{tg}(\lambda h)\text{th}(\lambda h))$ ;  $\lambda = \sqrt{\omega/2\nu}$ ;  $U = \cos(\pi d/l)$ ;  $\text{sh}(\dots)$ ,  $\text{ch}(\dots)$ ,  $\text{th}(\dots)$  – гіперболічний синус, косинус та тангенс, відповідно;  $P_n(U)$  – поліном Лежандра;  $d$  – усереднений діаметр отворів решета.

За розв'язком (6) встановлено поле швидкості БПС у лінійному наближенні (рис.2), яке залежить гармонійно від часу з частотою, та дорівнює частоті коливаний решета.

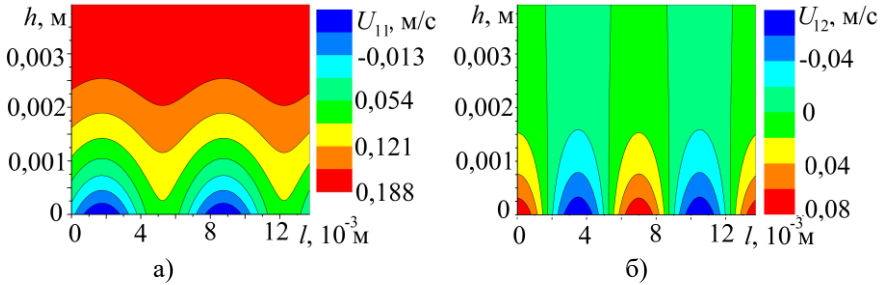
Усереднені за часом рівняння другого наближення, розв'язок яких моделює повільні стаціонарні потоки, що виникають в БПС, мають вигляд:

$$U_{11} \frac{\partial U_{11}}{\partial x_1} + U_{12} \frac{\partial U_{11}}{\partial x_2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x_1} + \nu \Delta U_{21}, \quad (7)$$

$$U_{11} \frac{\partial U_{12}}{\partial x_1} + U_{12} \frac{\partial U_{12}}{\partial x_2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_2}{\partial x_2} + \nu \Delta U_{22},$$

$$\frac{\partial U_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial U_{22}}{\partial x_2} = 0,$$

де  $\vec{U}_1 = (U_{11}, U_{12})$  – поле швидкості першого наближення;  $\bar{P}_2$  і  $\vec{U}_2 = (U_{21}, U_{22})$  – надлишковий тиск та поле швидкості другого наближення; риска позначає усереднення за часом.



а – поздовжні складові; б – вертикальні складові

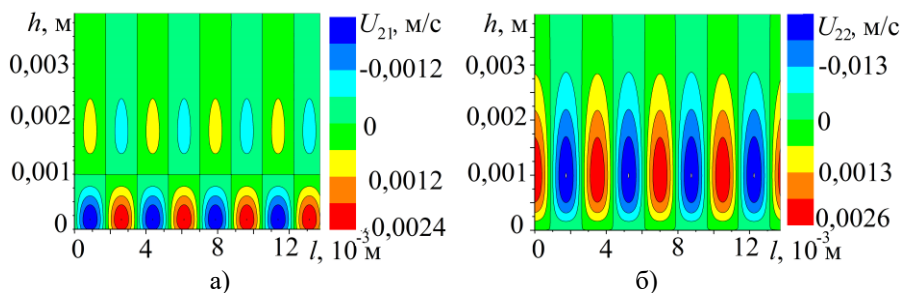
Рисунок 2 – Залежності складових швидкості БПС у першому наближенні за товщиною їх шару від періоду повторення отворів плоского віброрешета ( $A=0,0075$  м;  $\omega=41,86$  с $^{-1}$ ;  $\rho=600$  кг/м $^3$ ;  $V_0=0,5 \times 10^{-3}$  м/с;  $\mu=0,035$  Па с;  $S_p=19,6$  мм $^2$ )

Компоненти швидкості стаціонарного потоку БПС у другому наближенні визначали за виразами (рис.3):

$$U_{21} = -\frac{Bl}{64\pi\nu} \left[ \frac{e^{-\frac{4\pi h}{l}} \left(1 - 2(4\pi h/l)^2\right) \left( \frac{h \operatorname{sh}(4\pi x_2/l)}{\operatorname{sh}(4\pi h/l)} - x_2 \operatorname{ch}\left(\frac{4\pi}{l}(h-x_2)\right) \right)}{1 - (8\pi h/l)} + x_2 e^{-\frac{4\pi x_2}{l}} \left(1 - \frac{4\pi x_2}{l} + \frac{8\pi h}{l}\right) \right] \sin\left(\frac{4\pi x_1}{l}\right), \quad (8)$$

$$U_{22} = -\frac{Bl}{16\pi\nu} \left[ \frac{e^{-\frac{4\pi h}{l}} \left(1 - 2(4\pi h/l)^2\right) \left( x_2 \operatorname{sh}\left(\frac{4\pi}{l}(h-x_2)\right) + \frac{h \operatorname{sh}(4\pi x_2/l)}{\operatorname{ch}(4\pi h/l)} \right)}{1 - (8\pi h/l)} + x_2 e^{-\frac{4\pi x_2}{l}} \left(1 + \frac{4\pi x_2}{l} - \frac{8\pi h}{l}\right) \right] \cos\left(\frac{4\pi x_1}{l}\right),$$

де величина  $B = \left(\pi V_o^2 (1 - \cos(\pi d/l))^2\right) l^{-1}$ .



а – поздовжні складові; б – вертикальні складові

Рисунок 3 – Залежності складових швидкості БПС у другому наближенні за товщиною їх шару від періоду повторення отворів плоского віброрешета ( $A=0,0075$  м;  $\omega=41,86$  с $^{-1}$ ;  $\rho=600$  кг/м $^3$ ;  $V_0=0,5 \times 10^{-3}$  м/с;  $\mu=0,035$  Па с;  $S_p=19,6$  мм $^2$ )

Встановлено (рис.3), що поряд з членами, які періодично залежать від часу і змінюються з подвоєною частотою коливань віброрешіт, присутні постійні складові. Ці постійні складові описують ефект виникнення стаціонарних потоків, які утворюються поблизу поверхні віброрешета. Швидкість цих потоків залишається меншою від коливальної швидкості БПС в лінійному наближенні.

Рівняння динаміки частинок у БПС з щільністю  $\rho$  і коефіцієнтом динамічної в'язкості  $\mu$  має вигляд:

$$\rho_p \frac{dU_p}{dt} = \rho_p f^* (U - U_p) - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{2} \rho \frac{d}{dt} (U - U_p) + \frac{9}{2a} \sqrt{\frac{\rho \mu}{\pi}} \int_0^t \frac{d}{d\tau} (U - U_p) \frac{d\tau}{\sqrt{t - \tau}} + F, \quad (9)$$

де  $U = A\omega \cos \omega t$  і  $U_p$  – швидкість БПС і його частинки, відповідно;  $F = \rho_p g \sin \theta$  – сила, яка виражає дію гравітаційного поля Землі;  $f^*$  – коефіцієнт, який пов'язаний з силою опору:

$$f^* = \frac{3}{8} C(\text{Re}) \frac{\rho}{2\rho_p} |U - U_p|, \quad (10)$$

де  $C = C(\text{Re})$  – коефіцієнт опору, який залежить від числа Рейнольдса  $\text{Re}$ .

Вираз для відносної швидкості частинки ЗС, яка занурена у БПС, має вигляд:

$$V = \frac{2\rho_p g \sin \theta}{\Phi^* (\rho + 2\rho_p)} + \frac{2(\rho_p - \rho)A\omega^2}{(\rho + 2\rho_p) \sqrt{\omega^2 + \Phi^{*2}}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (11)$$

де  $\varphi = \arctg(\omega / \Phi^*)$ ;  $\Phi^* = 9\bar{\mu} / a^2 (\rho + 2\rho_p)$ .

Для уточнення діапазонів складових швидкості моделювання БПС на плоских віброрешетах проведено у тривимірному вигляді. Решето складається з базових комірок (рис.4) розмірами  $l_1$  і  $l_2$ , які містять отвори площею  $S$ . Введено декартову систему координат  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ . При цьому площина  $x_1$  і  $x_2$  співпадає з площиною віброрешета, а вісь  $x_3$  направлена вгору перпендикулярно цій площині.

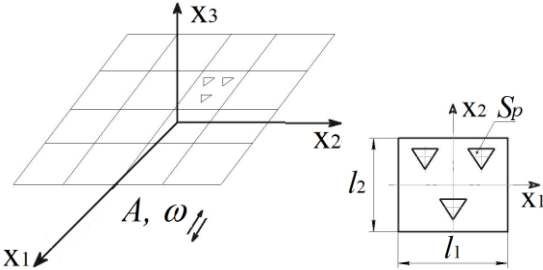


Рисунок 4 – Схеми структурного віброрешета і його базової комірки

відповідно, на  $nl_1$  і  $nl_2$ , де  $n$  – довільне ціле число. Решето здійснює вздовж осі  $x_1$  гармонійні коливання з амплітудою  $A$  і частотою  $\omega$ .

Поле швидкості  $\vec{V}$  БПС відповідає рівнянням:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \vec{V} + \rho \vec{f}, \quad (12)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (13)$$

де  $\rho = \bar{\rho}(1 - \delta_p) + \rho_p \delta_p$ , де  $\bar{\rho}$  – щільність газоподібного середовища бульбашок;  $\delta_p$  – об'ємна концентрація твердих частинок БПС;  $\vec{f} = g \sin \theta \vec{e}_1 - g \cos \theta \vec{e}_3$  – зовнішня сила, яка діє на одиницю маси БПС;  $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  – орти декартової системи координат  $x_1, x_2, x_3$ .

Приймаємо умови:  $\vec{V}|_{l<0} = 0$ ,  $P|_{l<0} = 0$ ,  $P|_{x_3=h} = 0$ ,  $\sigma_{ij}|_{x_3=h} = 0$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ .

На вільній поверхні БПС поле швидкості задовольняє умови:

$$\left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \Big|_{x_3=h} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3. \quad (14)$$

$$\text{При } x_3 = 0: \vec{V}_{cp}|_{x_3=0} = A\omega \sin \omega t \vec{e}_1; V_3|_{x_3=0} = V_0 \begin{cases} 1, & (x_1, x_2) \in \bigcup_{P=1}^N S_P, \\ 0, & (x_1, x_2) \notin \bigcup_{P=1}^N S_P. \end{cases}$$

де  $\bigcup_{P=1}^N S_P$  – множина отворів на базовій комірці віброрешета.

Обмеження на величину швидкості  $V_0$  БПС складають:  $L^*/T \gg V$ ,  $v/L^* \gg V$ , де  $L^*$  і  $T$  – характерні розміри довжини і часу зміни коливальної швидкості;  $v = \mu/\rho$ .

Віброрешето розглядається як двовимірна періодична структура з періодами  $l_1, l_2$  уздовж осей  $x_1, x_2$  (рис. 4). Базовою коміркою такої структури є прямокутник  $-l_1/2 \leq x_1 \leq l_1/2$  та  $-l_2/2 \leq x_2 \leq l_2/2$ , на якому розташовано  $N$  отворів  $S_{p1}, S_{p2}, \dots, S_{pN}$ .

Періодична структура утворюється трансляцією базової комірки вздовж осей  $x_1$  і  $x_2$ ,

Тоді:  $L^* \approx \min(l_1, l_2)$ ,  $T \approx \frac{2\pi}{\omega}$ ,  $V \approx A\omega$ , при  $A < \frac{L^*}{2\pi}$ ,  $\omega < \frac{v}{AL^*}$ .

Так як, віброрешето є двовимірною періодичною структурою з періодами  $l_1$  і  $l_2$ , то розв'язок задачі (12), (13) знаходимо у вигляді двовимірних рядів Фур'є за

базисними функціями  $\left( e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)} \right)_{n,m=-\infty}^{+\infty}$  :

$$\vec{V} = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} \vec{V}_{mn}(x_3, t) e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)}, \quad P = \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} P_{mn}(x_3, t) e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)}. \quad (15)$$

Таким чином, розв'язок задачі (12), (13) з урахуванням (15) має вигляд:  
– надлишковий тиск:

$$P = \rho g \cos \theta (h - x_3) - \frac{2V_0 \rho v}{l_1 l_2} \left[ \sum_{n \neq 0} \frac{B_{0n} \text{sh}(\gamma_{0n}(h - x_3))}{A_{0n}} e^{\frac{i2\pi n}{l_1} x_1} + \sum_{m \neq 0} \frac{B_{m0} \text{sh}(\gamma_{m0}(h - x_3))}{A_{m0}} e^{\frac{i2\pi m}{l_2} x_2} + \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{B_{mn} \text{sh}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)} \right], \quad (16)$$

– компоненти поля швидкості  $\vec{V} = V_1 \vec{e}_1 + V_2 \vec{e}_2 + V_3 \vec{e}_3$  :

$$V_1 = \frac{g \sin \theta}{2v} \left[ h^2 - (h - x_3)^2 \right] + A\omega \text{Re} \left[ \frac{\text{ch}(\sqrt{i\omega/v}(h - x_3))}{\text{ch}(\sqrt{i\omega/v}h) i} e^{i\omega t} \right] - \frac{i8\pi V_0 (h - x_3)}{l_1^2 l_2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{n B_{mn} \text{ch}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)}, \quad (17)$$

$$V_2 = -\frac{i8\pi V_0 (h - x_3)}{l_1 l_2^2} \sum_{n \neq 0} \sum_{m \neq 0} \frac{m B_{mn} \text{ch}(\gamma_{mn}(h - x_3))}{A_{mn}} e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)}, \quad (18)$$

$$V_3 = -\frac{V_0}{l_1 l_2} \sum_n \sum_m \frac{B_{mn} \left[ (h - x_3) \gamma_{mn} \text{sh}(\gamma_{mn}(h - x_3)) - \text{ch}(\gamma_{mn}(h - x_3)) \right]}{A_{mn}} e^{i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)}, \quad (19)$$

де  $A_{mn} = h\gamma_{mn} \text{sh}(\gamma_{mn}h) - \text{ch}(\gamma_{mn}h)$ ;  $\gamma_{mn} = 2\pi \sqrt{\left(n^2/l_1^2\right) + \left(m^2/l_2^2\right)}$ .

З (16) – (19) встановлено, що функціональна залежність від зміни  $x_1$  і  $x_2$  надлишкового тиску і компонент поля швидкості визначається коефіцієнтами  $B_{mn}$ , які, в свою чергу, суттєво залежать від взаємного розташування та геометричних параметрів отворів віброрешета.

Ці коефіцієнти визначаються за рівнянням:

$$B_{mn} = \sum_{P=1}^N \iint_{S_P} e^{-i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1 + \frac{m}{l_2}x_2\right)} dx_1 dx_2, \quad (20)$$

в якому підсумовування проводиться за всіма отворами, які розташовані на базовій комірці решета  $[-l_1/2, l_1/2] \times [-l_2/2, l_2/2]$ , або:

$$B_{mn} = \sum_{P=1}^N I_{mn}^P, \quad (21)$$

$$\text{де } I_{mn}^P = -\frac{i2\pi e^{-i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_{10}^P + \frac{m}{l_2}x_{20}^P\right)}}{\gamma_{mn}} \int_0^{L_P} e^{-i2\pi\left(\frac{n}{l_1}x_1^P(S) + \frac{m}{l_2}x_2^P(S)\right)} \times \left(\frac{m}{l_2} \cos F(S) - \frac{n}{l_1} \sin F(S)\right) dS,$$

$S$  – площа поверхні віброрешета.

Функції, які параметризують контур  $C_P$  отвору  $S_P$  мають вигляд:

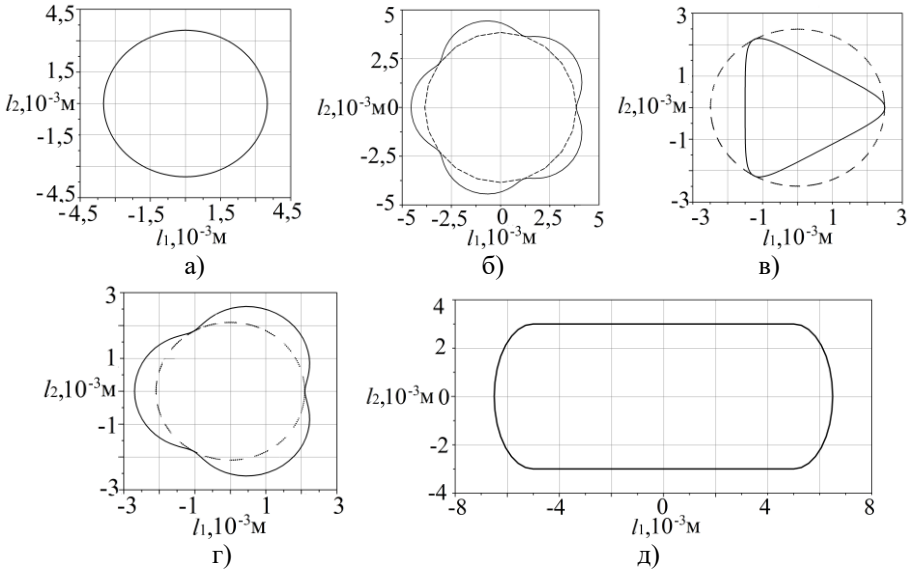
$$x_1^P = \int_0^{S^*} \cos F(S^*) dS^*, \quad x_2^P = \int_0^{S^*} \sin F(S^*) dS^*, \quad (22)$$

де  $S^*$  – довжина дуги, а  $F(S^*)$  виражається через  $f(S^*)$  за рівнянням:

$$F(S^*) = \int_0^{S^*} f(S^*) dS^*. \quad (23)$$

З урахуванням виразів (21)–(23) приймаємо рівняння, які характеризують геометрію отворів віброрешіт, що досліджуються. Використано наступні форми отворів віброрешіт (рис.5), які мають вигляд: епіциклоїди (ТЕА, ПЕА)  $x_1 = R_0(k+1)\cos(kt) - h_e \cos(kt+t)$ ,  $x_2 = R_0(k+1)\sin(kt) - h_e \sin(kt+t)$ ; гіпотрохоїди (рівностороннього трикутника)  $x_1 = R_0(1-k)\cos(kt) - h_e \cos(t-kt)$ ,  $x_2 = R_0(1-k)\sin(kt) - h_e \sin(t-kt)$ ; кола  $x_1 = R_0 \cos(t)$ ,  $x_2 = R_0 \sin(t)$ ; де  $k = r_e/R_0$ ,  $h_e = 2r_e/\pi$ ;  $R_0$  – радіус нерухомого кола;  $r_e$  – радіус кола, що обертається.

Так, наприклад, при моделюванні ЗС зернобобових культур досліджували решета з отворами у вигляді кола (базовий варіант) з параметрами  $R_0=0,0035$  м;  $k=0$  (рис.5, а). Підвищення ефективності ПП ЗС зернобобових культур реалізовано шляхом використання решіт з ПЕА, які побудовані за параметричним рівнянням епіциклоїди при:  $R_0=0,0035$  м і  $k=5$  (рис.5, б). При моделюванні ПП ЗС гречки досліджували решета з отворами у вигляді рівностороннього трикутника (базовий варіант) за рівнянням гіпотрохоїди з параметрами:  $R_0=0,0025$  м;  $k=3$  (рис.5, в). Інтенсифікація ПП ЗС гречки відбувається за рахунок використання решіт з ТЕА, отвори якого побудовані за параметричним рівнянням епіциклоїди при:  $R_0=0,0021$  м,  $k=3$  (рис.5, г). Для дослідження ПП ЗС кукурудзи розглянуто решета з ПОА з параметрами:  $R_S=0,016$  м,  $r_m=0,005$  м,  $l_1=0,008$  м,  $l_2=0,016$  м (рис.5, д).



а – круглі ( $R_0=0,0035$  м;  $k=0$ ); б – з ПЕА ( $R_0=0,0035$  м;  $k=5$ );  
в – трикутні ( $R_0=0,003$  м;  $k=3$ ); г – з ТЕА ( $R_0=0,0018$  м;  $k=3$ );  
д – з ПОА ( $R_S=0,016$  м,  $r_m=0,005$  м)

Рисунок 5 – Геометрія отворів віброрешіт

Таким чином, створення базової комірки, її трансляція (рис.4) та введення параметрів самого отвору (21) – (23) складають модульний принцип математичного моделювання динамічних процесів при просіюванні ЗС на віброрешетах.

Середня товщина шару ЗС  $h^*$  розраховується за виразом:

$$h^* = \left( h_0^3 - \frac{3V_0Lv}{g \sin \theta} \right)^{1/3}, \quad (24)$$

де  $L$  – довжина віброрешета,  $h_0$  – початкова товщина шару ЗС.

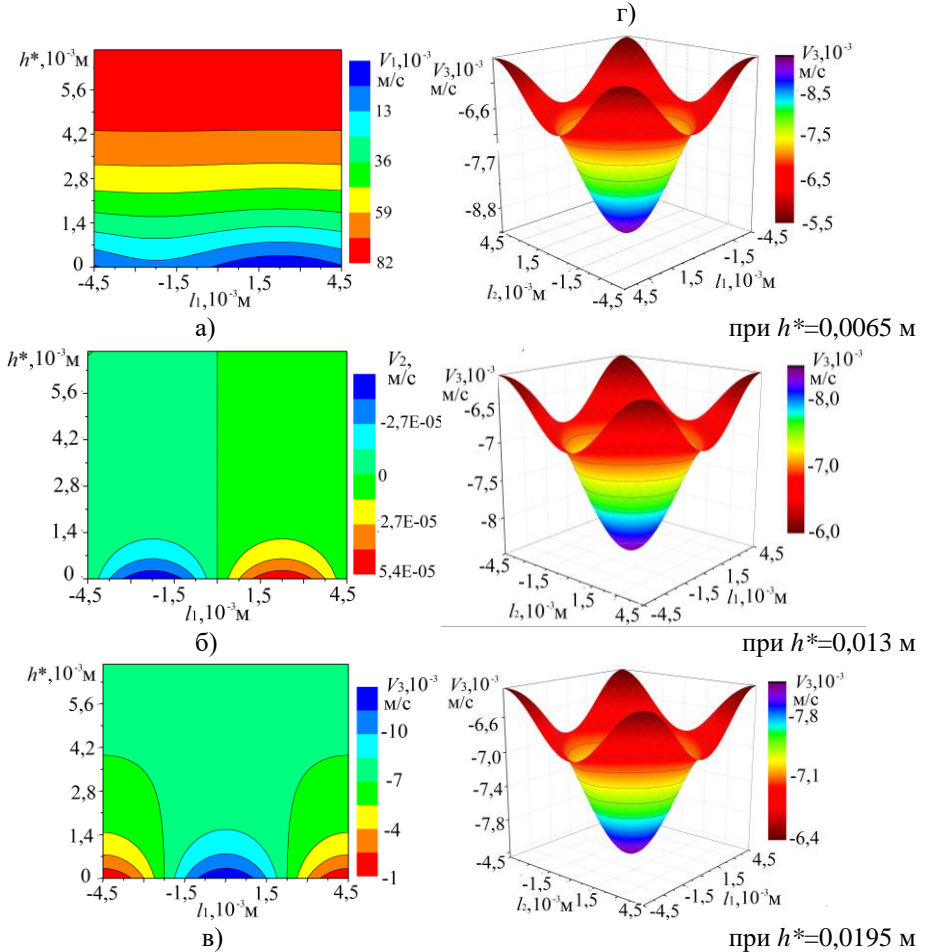
В результаті моделювання отримані поля швидкості ЗС ( $V_1, V_2, V_3$ ) на плоских решетах для базових кінематичних режимів і характерних навантажень (рис.6).

Побудована тривимірною гідродинамічна модель дозволяє визначати поле швидкості БПС на нахиленому плоскому решеті, що здійснює гармонічні коливання у своїй площині. Встановлено, що компоненти швидкості БПС є періодичними функціями просторових змінних у площині структурного віброрешета, а їх величини визначаються коефіцієнтами, які залежать від взаємного розташування і геометричних параметрів отворів віброрешета. Отримано діапазони складових швидкості БПС на базових віброрешетах (з круглими, трикутними і прямокутними отворами) і на розроблених з активаторами (ТЕА, ПЕА, ПОА).

Використання розроблених віброрешіт з активаторами дозволило підвищити вертикальні складові швидкості ЗС, а відповідно і їх просіювання (рис.7, а): з ПЕА

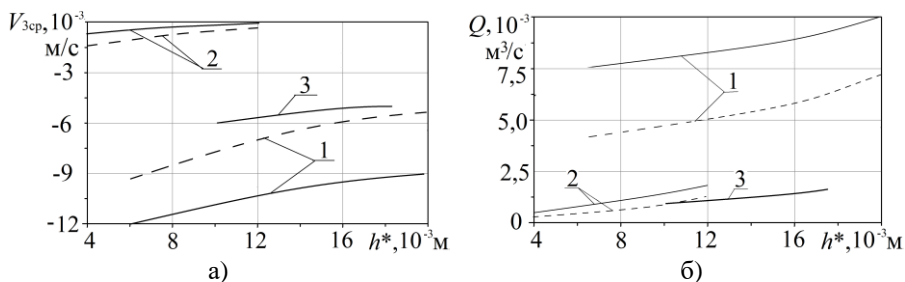


на 26,6...58,2 %, порівняно з базовими решетами з круглими отворами; з ТЕА – на 15,5...19 %, порівняно з базовими решетами з трикутними отворами. Встановлено, що зміна кінематичних параметрів паспортних режимів зернових віброрешетів несуттєво (до 2 %) впливає на динамічні характеристики БПС.



а – поздовжні складові; б – поперечні складові; в, г – вертикальні складові

Рисунок 6 – Поле швидкості БПС за середньою товщиною шару  $h^*$ , відносно періодів розташування отворів ( $l_1, l_2$ ) плоского віброрешета ( $A=0,0075 \text{ м}$ ;  $\omega=48,12 \text{ рад/с}$ ;  $l_1=l_2=0,009 \text{ м}$ ;  $\bar{\rho}=1,21 \text{ кг/м}^3$ ;  $\delta_p=0,63$ ;  $\mu_{\Pi}=1,78 \times 10^{-5} \text{ Па с}$ ;  $\delta_{\Pi}=0,37$ ;  $\rho=750 \text{ кг/м}^3$ ;  $f=0,5$ ;  $k_f=0,9$ ;  $a=0,003 \text{ м}$ ;  $\theta=8^\circ$ ;  $V_0=0,35 \times 10^{-3} \text{ м/с}$ ;  $L=1 \text{ м}$ ;  $H=1 \text{ м}$ ;  $R_0=0,0035 \text{ м}$ ;  $k=0$ )



а – вертикальні складові швидкості ЗС; б – загальна об'ємна продуктивність;  
 1 – ЗС гороху ( - - - - решето з круглими отворами; ———— решето з ПЕА);  
 2 – ЗС гречки ( - - - - решето з трикутними отворами; ———— решето з ТЕА);  
 3 – ЗС кукурудзи (решето з ПОА)

Рисунок 7 – Залежності швидкості та продуктивності плоских  
 віброрешіт від середньої товщини шару ЗС  
 ( $A=0,0075$  м;  $\omega=48,12$  рад/с;  $\theta=8^\circ$ ;  $L=1$  м;  $\mu_{\Pi}=1,78 \times 10^{-5}$  Па с;  $H=1$  м)

Одним із основних технологічних параметрів, що характеризує ПП ЗС на віброрешетах, є загальна об'ємна продуктивність (рис.7, б), яка визначається за виразом:

$$Q = Q_C + Q_{\Pi} = V_1^{cp} h^* H + V_3^{cp} \bar{S}_p, \quad (25)$$

де  $Q_C$ ,  $Q_{\Pi}$  – продуктивність сходової та прохідної фракції БПС, відповідно;  
 $H$ ,  $\bar{S}_p$  – ширина віброрешета і площа його отворів, відповідно;  $V_1^{cp}$ ,  $V_3^{cp}$  –  
 компоненти швидкості усередненої за об'ємом БПС:

$$V_1^{cp} = \frac{g \sin \theta h^{*2}}{3\nu} + \frac{A}{h^*} \sqrt{\omega \nu} \operatorname{Re} \left[ e^{i \left( \omega t - \frac{3\pi}{4} \right)} + h^* \left( \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}} h^* (1+i) \right) \right], \quad (26)$$

$$V_3^{cp} = \frac{V_0}{S_p l_1 l_2} \sum_{m,n=-\infty}^{+\infty} |B_{mn}|^2 D_{mn}, \quad (27)$$

$$\text{де } V_0 = V_3 \Big|_{x_3=0}; \quad D_{mn} = \frac{1 - \frac{2}{\gamma_{mn} h^*} + \operatorname{th}(\gamma_{mn} h^*)}{\gamma_{mn} h^* + \operatorname{th}(\gamma_{mn} h^*) - 1}.$$

Математичне моделювання ПП дозволило визначити загальну об'ємну продуктивність віброрешіт, яка в залежності від їх завантаження знаходиться в діапазонах: 0,0039...0,0068 м³/с – для решіт з круглими отворами; 0,0075...0,01 м³/с – з ПЕА; 0,0004...0,0013 м³/с – для решіт з трикутними отворами; 0,0005...0,0018 м³/с – з ТЕА; 0,0008...0,0011 м³/с – з ПОА.

Продуктивність плоских віброрешіт, внаслідок використання активаторів, підвищується: з ПЕА на 47...92,3% (до 0,01 м³/с) та з ТЕА – на 25...38,4% (до 0,0018 м³/с), порівняно з базовими решетами.

У третьому розділі за гідродинамічною аналогією проведено математичне моделювання динаміки БПС на структурних циліндричних віброрешетах.

Для побудови математичної моделі ПП БПС розроблено схему (рис.8).

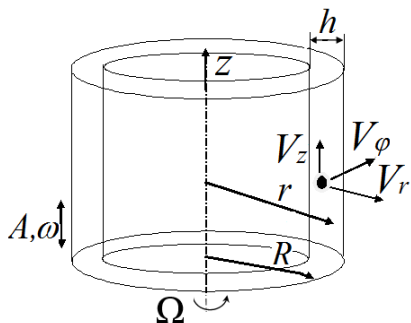


Рисунок 8 – Схема структурного циліндричного віброрешета

Вертикальне циліндричне решето з радіусом  $R$  здійснює рівномірний обертальний рух навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю  $\Omega$ , коливальний рух вздовж цієї осі з коловою частотою  $\omega$  і амплітудою  $A$ . Позначено через  $\vec{\Omega}$  вектор кутової швидкості решета, який направлений вздовж осі  $z$  циліндричної системи координат  $r, \varphi, z$  з ортами  $\vec{e}_r, \vec{e}_\varphi, \vec{e}_z$ .

Поверхня віброрешета являє собою двовірну періодичну структуру з періодом  $\Delta z$  уздовж аксіальної координати  $z$  та періодом  $\Delta\varphi R$  вздовж азимутальної координати  $\varphi$ . Базовою коміркою такої структури є область:  $\left\{ (\varphi, z): -\frac{\Delta\varphi R}{2} \leq \varphi \leq \frac{\Delta\varphi R}{2}, -\frac{\Delta z}{2} \leq z \leq \frac{\Delta z}{2} \right\}$ ,

на якій розташовано  $N$  отворів. Періодична структура моделюється також за модульним принципом трансляцією базової комірки вздовж осі  $z$  та твірної циліндричного віброрешета, відповідно на  $n\Delta z$  та  $m\Delta\varphi R$  ( $n, m$  – цілі числа).

Рух кільцевого шару ЗС розглянуто за аналогією з моделюванням на плоских віброрешетах, як рух БПС, що містить газоподібні бульбашки. В цьому випадку ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості (усереднений за товщиною кільцевого шару БПС) апроксимували за (1).

В якості допущень та спрощень введено: коефіцієнт інтенсивності вібрацій  $G = (A\omega^2)/(\Omega^2 R)$ ; коефіцієнт внутрішнього тертя  $f = f_0(1 + e^{-G})/2$ . Ефективну щільність БПС визначали аналогічно розв'язку динаміки на плоскому віброрешеті.

Поле відносної швидкості  $\vec{V}$  при цьому задовольняє рівнянням:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P - \rho g \vec{e}_z + \vec{F} + \mu \Delta \vec{V}, \quad (28)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (29)$$

де  $\vec{F} = -\vec{a}_0 \rho - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} \rho - \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \rho$ ,  $-\vec{a}_0 \rho$  – сила інерції поступального руху решета;  $\vec{a}_0 = -A\omega^2 \sin \omega t \vec{e}_z$ ;  $-2\vec{\Omega} \times \vec{V} \rho$  – Коріолісова сила;  $-\vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \rho$  – відцентрова сила.

Умови для поля відносної швидкості та тиску мають вигляд:

$$P|_{t \leq 0} = 0; \quad \bar{V}|_{t \leq 0} = 0; \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \left( -p + 2\mu \frac{\partial V_r}{\partial r} \right) \Big|_{r=R-h} &= \left( -p + \frac{2\mu}{r} \left( \frac{\partial V_\varphi}{\partial \varphi} + V_r \right) \right) \Big|_{r=R-h} = 0; \\ \left( -p + 2\mu \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \Big|_{r=R-h} &= \left( \frac{\partial V_r}{\partial z} + \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) \Big|_{r=R-h} = 0; \\ \left( \frac{\partial V_z}{\partial \varphi} + r \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} \right) \Big|_{r=R-h} &= \left( r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} - V_\varphi + \frac{\partial V_r}{\partial \varphi} \right) \Big|_{r=R-h} = 0. \end{aligned}$$

На поверхні решета ( $r=R$ ) відносна швидкість  $\bar{V}$  перетворюється в нуль. При цьому на поверхні отворів компонента швидкості  $V_r$  співпадає з середньою швидкістю  $V_0$  проходження БПС через отвори. Розв'язок початково-крайової задачі (28) – (30) розглянуто незалежним від азимутальної координати  $\varphi$  (осесиметричні коливання).

Розв'язок задачі, з врахуванням умов і припущень, отримано у вигляді рядів Фур'є за базисними функціями  $\left( e^{i \frac{2\pi n}{l} z} \right)_{n=-\infty}^{+\infty}$ , де  $l$  – період повторень отворів вібросешета вздовж координати  $z$ :

$$\begin{aligned} V_r &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} V_{nr}(r,t) e^{i \frac{2\pi n}{l} z}, & V_\varphi &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} V_{n\varphi}(r,t) e^{i \frac{2\pi n}{l} z}, & (31) \\ V_z &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} V_{nz}(r,t) e^{i \frac{2\pi n}{l} z}, & P &= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} P_n(r,t) e^{i \frac{2\pi n}{l} z}. \end{aligned}$$

Тоді маємо:

$$\frac{\partial V_{nr}}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P_n}{\partial r} - 2\Omega V_{n\varphi} + r\Omega^2 \delta_{on} + v \left( \frac{\partial^2 V_{nr}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{nr}}{\partial r} - \left( \frac{2\pi n}{l} \right)^2 V_{nr} - \frac{V_{nr}}{r^2} \right), \quad (32)$$

$$\frac{\partial V_{n\varphi}}{\partial t} = -2\Omega V_{nr} + v \left( \frac{\partial^2 V_{n\varphi}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{n\varphi}}{\partial r} - \left( \frac{2\pi n}{l} \right)^2 V_{n\varphi} - \frac{V_{n\varphi}}{r^2} \right), \quad (33)$$

$$\frac{\partial V_{nz}}{\partial t} = -\frac{i 2\pi n}{l\rho} P_n + v \left( \frac{\partial^2 V_{nz}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_{nz}}{\partial r} - \left( \frac{2\pi n}{l} \right)^2 V_{nz} \right) - g \delta_{on} + A \omega^2 \sin \omega t \delta_{on}, \quad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} (r V_{nr}) + r \frac{i 2\pi n}{l} V_{nz} = 0, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (35)$$

де  $\delta_{on}$  – символ Кронекера.

Розв'язок будується за допомогою перетворення Лапласа за часовою змінною  $t$  і методу лишок.

Остаточко, для сталого режиму руху, маємо:

$$V_{or} = \frac{\delta V_0 (2R - h^*)}{2r}, \quad V_{o\varphi} = \frac{\delta V_0 R \Omega}{v} r \ln \frac{r}{R}, \quad (36)$$

$$V_{oz} = \frac{g \left( r^2 - R^2 - 2(R - h^*)^2 \ln \frac{r}{R} \right)}{4v} + A \omega \operatorname{Re}(F(i\omega) e^{i\omega t}),$$

$$\text{де } F(i\omega) = \frac{K_1(x_2)I_0(x) + I_1(x_2)K_0(x)}{I_0(x_1)K_1(x_2) + K_0(x_1)I_1(x_2)} - 1; \quad x_1 = \lambda R e^{i\pi/4}; \quad x_2 = \lambda(R - h^*) e^{i\pi/4};$$

$\lambda = \sqrt{\omega/v}$ ;  $x = \lambda r e^{i\pi/4}$ ;  $K_0(\dots)$ ,  $K_1(\dots)$  та  $I_0(\dots)$ ,  $I_1(\dots)$  – відповідно функції Кельвіна і модифіковані функції Бесселя.

Величина  $\delta$  в (36) враховує параметри отворів віброрешета та визначається:

$$\delta = \varepsilon \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|B_{on}|^2}{|B_{oo}|^2} D_{on} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|B_{no}|^2}{|B_{oo}|^2} D_{no} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{|B_{mn}|^2 + |B_{mm}^2|^2}{|B_{oo}|^2} D_{mnc} \right]; \quad (37)$$

$$\text{де } D_{mnc} = \frac{\lambda_{mn} - 2}{\lambda_{mn}(\lambda_{mn} - 1)}; \quad \lambda_{mn} = 2\pi h^* \sqrt{\frac{n^2}{l_1^2} + \frac{m^2}{l_2^2}}, \quad \text{де } l_1 = R\Delta\varphi \text{ та } l_2 = \Delta z - \text{розміри}$$

базової комірки циліндричного віброрешета;  $\varepsilon$  – «живий» перетин віброрешета.

Прийнято нерівність, яка визначається виробничими умовами роботи циліндричних віброрешіт:  $\sqrt{\omega/v} r \geq 10$ , де  $r$  – поточний радіус елемента БПС в інтервалі  $R - h^* \leq r \leq R$ . Її виконання дозволяє використовувати для розрахунків модифікованих беселевих функцій і функцій Кельвіна наближені асимптотичні вирази:

$$I_p(z) \approx \sqrt{\frac{\pi z}{2}} (e^z + (-1)^p i e^{-z}); \quad K_p(z) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2z}} e^{-z}; \quad p = 0, 1. \quad (38)$$

За допомогою (38) отримано вирази для визначення поля абсолютної швидкості для сталого режиму руху шару БПС:

$$V_r^a = \frac{\delta V_0 (2R - h^*)}{2r}, \quad V_\varphi^a = \Omega r \left( 1 + \frac{\delta V_0 R}{v} \ln \frac{r}{R} \right), \quad (39)$$

$$V_z^a = \frac{g \left( r^2 - R^2 - 2(R - h^*)^2 \ln \frac{r}{R} \right)}{4v} + A \omega \sqrt{r/R} e^{-\lambda(R-r)} \times$$

$$\times \left[ \cos(\lambda(r-R) + \omega t) \left( 1 + \frac{R-r}{16rR\lambda} \right) + \frac{R-r}{16rR\lambda} \sin(\lambda(r-R) + \omega t) \right].$$

Це дозволило отримати рівняння для визначення загальної продуктивності віброрешета за об'ємом БПС:

$$Q = Q_{II} + Q_C = 2\pi RL\varepsilon\delta V_0 + 2\pi \int_{R-h}^R V_z^a r dr = 2\pi RL\varepsilon\delta V_0 + \quad (40)$$

$$+ \frac{\pi g}{8\nu} \left[ R^4 - 2h^{*2} (2R - h^*)^2 + 4(R - h^*)^4 \ln(1 - h^*/R) \right] + A \sqrt{\frac{\omega\nu}{2}} [\cos \omega t A_1 + \sin \omega t A_2],$$

$$\text{де: } A_1 = 1 + e^{-\lambda h^*} \left( \left( \frac{h^*}{R} - 1 \right) \cos \lambda h + \left( \frac{1}{\lambda R} + \frac{h^*}{R} + 1 \right) \sin \lambda h^* \right);$$

$$A_2 = 1 - \frac{1}{\lambda R} - e^{-\lambda h^*} \left( \left( 1 - \frac{1}{\lambda R} - \frac{h^*}{R} \right) \cos \lambda h^* + \left( 1 - \frac{h^*}{R} \right) \sin \lambda h^* \right).$$

Для визначення поля швидкості у перехідному режимі руху БПС в (40) додано доданок у вигляді інтегралу:

$$\frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-qt} \operatorname{Im}(\bar{V}_\varphi^a) dq, \quad \frac{1}{\pi} \int_0^\infty e^{-qt} \operatorname{Im}(\bar{V}_z^a) dq, \quad (41)$$

де  $\bar{V}_\varphi^a$ ,  $\bar{V}_z^a$  – перетворення Лапласа функцій  $V_\varphi^a$ ,  $V_z^a$  за (39).

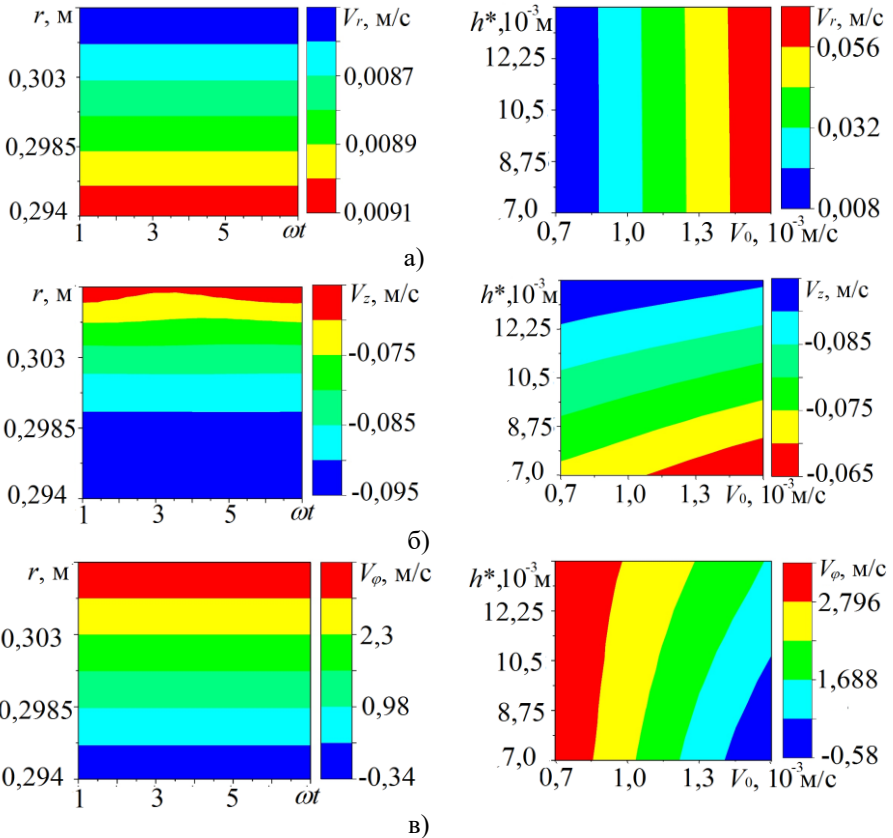
Таким чином, побудована теорія осесиметричних рухів кільцевого шару БПС всередині циліндричного віброрешета, яке здійснює рівномірний обертальний рух навколо вертикальної осі та поздовжні гармонійні коливання. Розроблена математична модель дозволяє вперше визначати компоненти швидкості БПС, як функції від характеристик вібраційних коливань решета, так і від її фізико-технологічних параметрів. Розроблена модель є універсальною та може бути використана для моделювання динамічних процесів на вібраційних структурних поверхнях, як в сталому, так і перехідному режимах руху сипких середовищ.

В результаті моделювання отримані поля швидкостей БПС (рис.9) та визначені діапазони складових швидкостей БПС під час роботи розроблених віброрешіт з активаторами просіювання: ПЕА –  $V_r = 0,0085 \dots 0,0091$  м/с;  $V_z = -0,07 \dots -0,095$  м/с;  $V_\varphi = -0,34 \dots 2,96$  м/с; ТЕА –  $V_r = 0,006 \dots 0,0065$  м/с;  $V_z = -0,066 \dots -0,086$  м/с;  $V_\varphi = 1,96 \dots 2,96$  м/с; ПОА –  $V_r = 0,0062 \dots 0,0068$  м/с;  $V_z = -0,067 \dots -0,094$  м/с;  $V_\varphi = 0,5 \dots 2,57$  м/с.

Встановлено, що зі збільшенням швидкості проходження через отвори радіальна складова швидкості БПС підвищується: в 6,9 рази (до 0,056 м/с) на решетах з ПЕА; в 3,5 рази (до 0,014 м/с) на решетах з ТЕА; в 11 разів (до 0,022 м/с) на решетах з ПОА. При цьому поздовжні складові швидкості суміші навпаки знижуються на 27,8...30,1 %.

Також встановлено, що зі збільшенням коефіцієнта концентрації бульбашок радіальні складові швидкості БПС підвищуються в 1,77 рази (до 0,012 м/с) на решетах з ПЕА; в 1,67 рази (до 0,0083 м/с) на решетах з ТЕА; у 1,23 рази (до

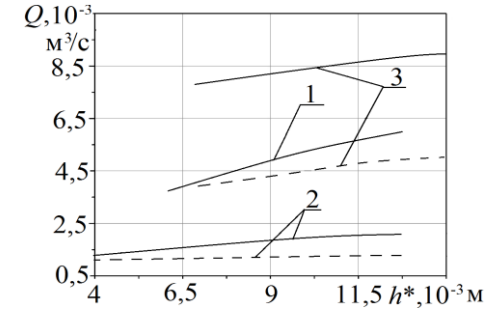
0,0075 м/с) на решетах з ПОА. При цьому поздовжні складові швидкості суміші також підвищуються в 1,6...2,1 рази.



а – радіальні складові; б – поздовжні складові; в – тангенціальні складові  
 Рисунок 9 – Залежності складових швидкості БПС від періоду його коливань  $\omega t$  і швидкості проходження  $V_0$  через отвори циліндричних віброрешіт з ПЕА за поточним радіусом  $r$  та середньо товщиною шару  $h^*$  ( $A=0,006$  м;  $\omega=96,9$  с $^{-1}$ ;  $R=0,3075$  м;  $L=0,49$  м;  $l_1=l_2=0,008$  м;  $\mu_{\text{П}}=1,78 \times 10^{-5}$  Па с;  $\Omega=11,77$  с $^{-1}$ ;  $f=0,7$ ;  $\delta_{\text{П}}=0,37$ ;  $\rho=750$  кг/м $^3$ ;  $\delta_{\text{Р}}=0,63$ ;  $k_f=0,9$ ;  $a=0,0035$  м;  $R_0=0,0035$  м;  $k=5$ )

Встановлено, що з підвищенням завантаження (товщини шару  $h^*$ ) радіальні складові швидкості БПС збільшуються: на 30,5...30,6 % (до 0,009 м/с) на решетах з ПЕА, порівняно з базовими круглими отворами; в 1,76...1,8 рази (до 0,0067 м/с) на решетах з ТЕА, з базовими трикутними отворами. Поздовжні складові швидкості БПС, зі збільшенням їх товщини шару також підвищуються на розроблених віброрешетах: з ПЕА на 17,2 % (до 0,087 м/с); з ТЕА на 31,7 % (до 0,083 м/с); з ПОА на 26,7 % (до 0,09 м/с).

Розв'язками математичних моделей отримані функціональні залежності ефективності ПП БПС, у вигляді закономірностей зміни загальної об'ємної продуктивності (рис.10). Встановлені діапазони варіювання загальної об'ємної продуктивності циліндричних віброрешіт: з ТЕА –  $Q=0,0013\dots0,0023$  м<sup>3</sup>/с, з ПЕА –  $Q=0,008\dots0,009$  м<sup>3</sup>/с, з ПОА –  $Q=0,0034\dots0,0054$  м<sup>3</sup>/с.



1 – ЗС кукурудзи (— – розроблені решета з ПОА); 2 – ЗС гречки (----- – базові решета з трикутними отворами; — – розроблені решета з ТЕА); 3 – ЗС гороху (— – розроблені решета з ПЕА; ----- – базові решета з круглими отворами)

Рисунок 10 – Залежності загальної об'ємної продуктивності циліндричних віброрешіт за середньою товщиною шару ЗС при їх просіюванні ( $A=0,006$  м;  $\omega=96,9$  с<sup>-1</sup>;  $R=0,3075$  м;  $L=0,49$  м;  $\Omega=11,77$  с<sup>-1</sup>)

Встановлені залежності ефективності ПП від характерних значень швидкості проходження ЗС через отвори віброрешіт та концентрації в ній бульбашок, які дозволили визначити діапазони варіювання сходової, проходової та загальної об'ємної продуктивності. Збільшення товщини шару ЗС, у діапазонах що досліджуються, підвищує об'ємну продуктивність на віброрешетах з активаторами на 11...70%.

Встановлено, що використання розроблених циліндричних віброрешіт з активаторами підвищує загальну об'ємну продуктивність: при ПЕА на 84...95% (до 0,009 м<sup>3</sup>/с), порівняно з базовими круглими отворами; при ТЕА на 38,5...55 % (до 0,0023 м<sup>3</sup>/с) порівняно з базовими трикутними отворами.

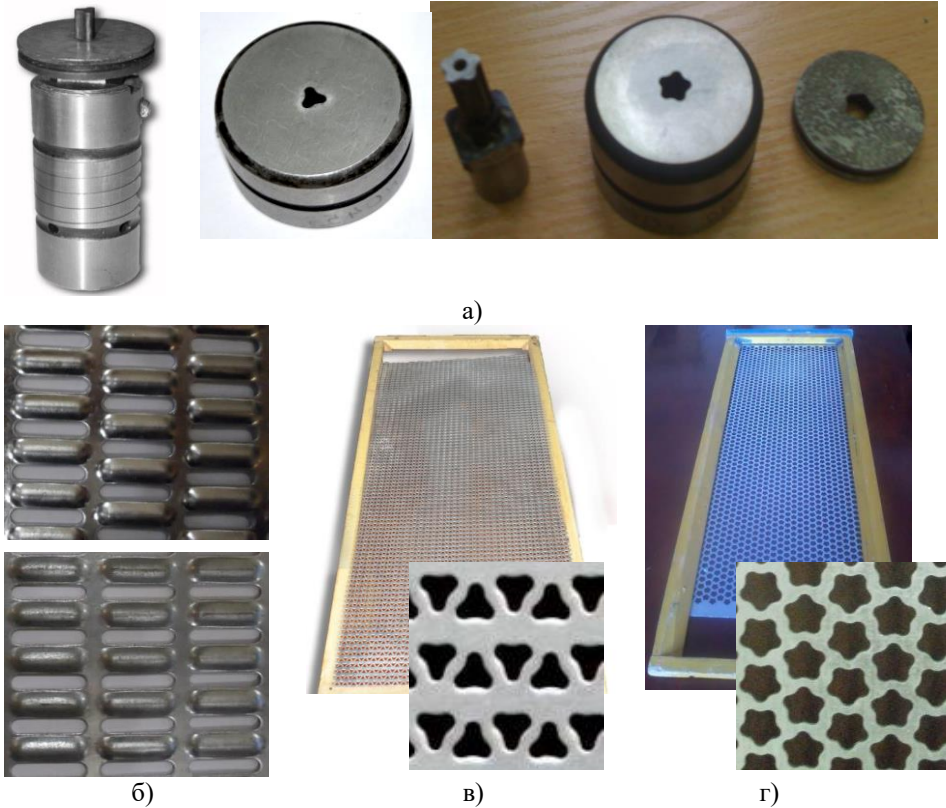
**У четвертому розділі** наведено характеристику об'єктів, програму та методику експериментальних досліджень.

Дослідження інтенсифікації ПП ЗС виконували на експериментальних плоскорешітному та відцентровому вібросепараторах, лабораторних установках. Відповідно до програми досліджень створено робочі інструменти та виготовлені решета з активаторами різних типів (рис.11). Використано ЗС кукурудзи, гречки, гороху та нуту природних гранулометричних складів, для визначення характеристик яких застосовувались розроблені та базові методики, рекомендовані ДСТУ.

Для експериментального визначення гідродинамічних характеристик ЗС запропоновано і реалізовано методи досліджень. Так, визначення поля швидкості ЗС здійснювали за допомогою використання відеозйомки, шляхом вимірювання траєкторії руху насінин. Діапазони значень коефіцієнтів динамічної в'язкості ЗС на розроблених решетах визначено за допомогою методу з використанням тензометрування. Розроблений метод і проведене експериментальне визначення швидкості проходження ЗС через отвори розроблених решіт.



Запропоновано та реалізовано експериментальний метод визначення розмірів та коефіцієнтів форми насінин ЗС за допомогою створеного лабораторного обладнання та програмного забезпечення (програма «ImgToVal»). Реалізація методу дозволила ідентифікувати розмірні характеристики частинок ЗС і підвищити точність моделювання.



а – пуанسونи та матриці; б – ПОА; в – ТЕА; г – ПЕА

Рисунок 11 – Загальний вигляд інструментів та розроблених віброрешіт з активаторами

Запропоновані методики для проведення експериментальних досліджень є аутентичними, і дозволили отримати параметри ПП ЗС з необхідною точністю.

Для оптимізації параметрів ПП ЗС обрано методи, які полягали у проведенні багатofакторного експерименту відповідно плану Бокса-Бенкіна для розроблених решіт з активаторами.

**У п'ятому розділі** виконано оцінку збігу результатів теоретичних положень інтенсифікації ПП ЗС, підтверджено адекватність одержаних математичних моделей, шляхом реалізації експериментальних досліджень.

Експериментальними дослідженнями встановлено підвищення повноти розділення ЗС за рахунок використання плоских розроблених віброрешіт (рис.12): з ТЕА при розділенні ЗС гречки на 25...41 %; з ПЕА при розділенні ЗС гороху на 90...95% і нуту на 23,8...25%; з ПОА при розділенні ЗС кукурудзи на 30...35%. За експериментально-обґрунтованими параметрами розроблених плоских і циліндричних віброрешіт з активаторами підтверджено підвищення їх продуктивності, з відхиленням від результатів теоретичних досліджень до 3%.



Рисунок 12 – Залежності повноти розділення ЗС на плоских віброрешетах від їх питомого завантаження

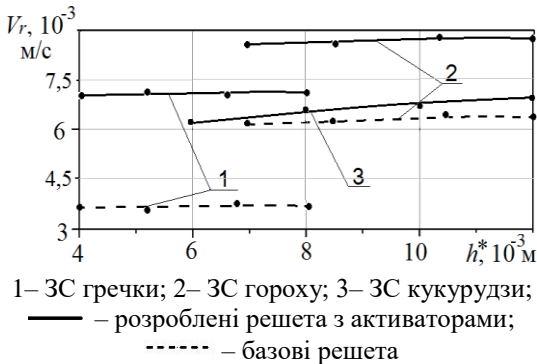


Рисунок 13 – Залежності радіальних складових швидкості ЗС від товщини їх шару на віброрешетах ( $A=0,006$  м;  $\omega=96,9$  с<sup>-1</sup>;  $R=0,3075$  м;  $L=0,49$  м;  $\Omega=11,77$  с<sup>-1</sup>)

порівняно з базовими з трикутними отворами. Діапазони варіювання отриманих складових швидкості ЗС підтверджують результати теоретичних досліджень з розбіжністю до 3,5 %.

При цьому, якість фракцій на базових і розроблених віброрешетах аналогічна – відхилення у розмірних характеристиках і масі 1000 насінин склало до 2 %. Запропоновано та реалізовано експериментальний метод визначення гідродинамічних характеристик частинок ЗС за їх траєкторними змінами з використанням відеозйомки. Експериментально уточнено діапазони складових швидкості ЗС на плоских і циліндричних віброрешетах.

Встановлено, що використання плоских розроблених віброрешіт з активаторами підвищує вертикальні складові швидкості ЗС гречки на 15,5...18,7 %, ЗС гороху на 27,3...56,8 %, порівняно з базовими решетами з трикутними і круглими отворами, відповідно.

Дослідженнями розроблених циліндричних віброрешіт з активаторами також встановлено підвищення радіальних складових швидкості ЗС (рис.13): гороху на 28...30 % до 0,009 м/с на решетах з ПЕА, порівняно з базовими з круглими отворами; гречки – на 70...75 % до 0,0065 м/с на решетах з ТЕА,

Застосування запропонованої методики на розроблених плоских віброрешетах дозволило отримати значення коефіцієнтів динамічної в'язкості для ЗС (рис.14): гороху – 0,04...0,074 Па·с, гречки – 0,009...0,026 Па·с, кукурудзи – 0,067...0,098 Па·с.

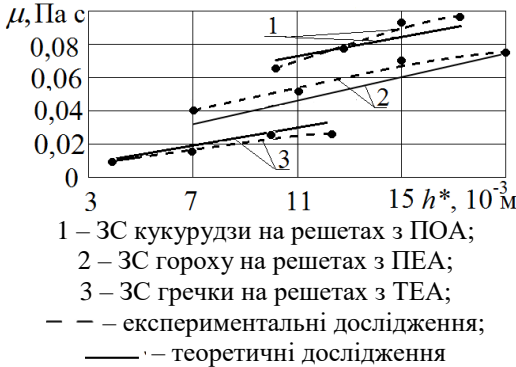
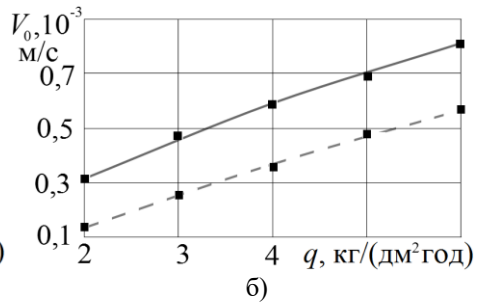
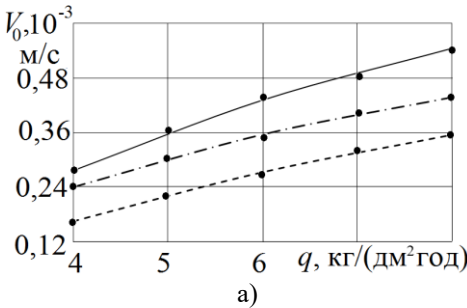


Рисунок 14 – Залежності ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості ЗС від товщини їх шару ( $A=0,0075$  м;  $\omega=48,12$  рад/с)

методу ідентифікації розмірних характеристик насіння ЗС визначено їх коефіцієнти форми, які є значущими параметрами ПП ЗС на віброрешетах: гороху – 0,89...0,93; нуту – 0,78; кукурудзи – 1,65...2,08.



а – ЗС кукурудзи; б – ЗС гороху;

- — — розроблені решета з шаховим розташуванням ПОА;
- - - розроблені решета з рядним розташуванням ПОА;
- - - базові решета з прямокутними отворами;
- базові решета з круглими отворами; ■-■- розроблені решета з ПЕА

Рисунок 15 – Залежності швидкості проходження ЗС через отвори плоских віброрешіт від їх питомої завантаженості

Дослідженнями підтверджено вплив форми насіння ЗС на ефективність ПП. Отримані закономірності повноти розділення для ЗС, просіювання яких

досліджувалося (рис.16). Встановлено, що варіювання форми насіння ЗС при їх розділенні на плоских розроблених решетах з активаторами змінює ефективність просіювання: нуту на 23...25 %; гороху на 90...95 %; кукурудзи на 5...21 %. Діапазони повноти розділення для розроблених віброрешіт з активаторами склали для ЗС: зернобобових культур ( $k_f=0,78...0,93$ ) – 38...84,5 %; кукурудзи ( $k_f=1,65...2,08$ ) – 65,4...96,7 %. Отримані закономірності повноти розділення ЗС від коефіцієнта форми їх насінин дозволяють прогнозувати і керувати ефективністю ПП на віброрешетах.

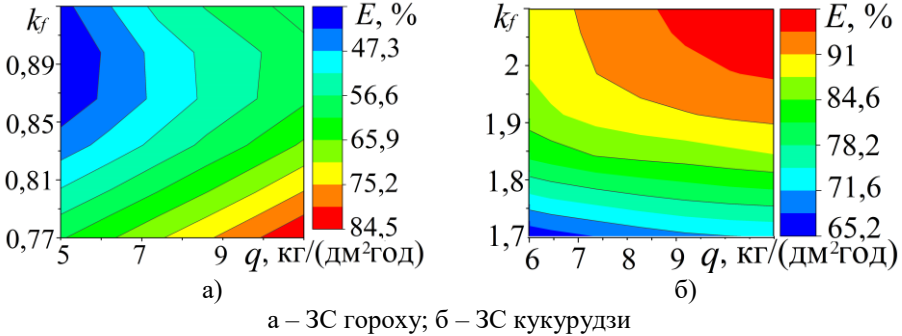


Рисунок 16 – Залежності повноти розділення ЗС від коефіцієнтів форми їх насінин і завантаження розроблених віброрешіт

За допомогою методу скінченних елементів на основі програмного продукту Pro/ENGINEER версія Wildfire 4.0 Випуск M120 та даних експериментальних досліджень вперше встановлено залежності еквівалентних напружень (рис.17) та довговічності віброрешіт, які враховують параметри активаторів, завантаження та властивості ЗС. Максимальні еквівалентні напруження мають місце між отворами в центральній частині віброрешіт та у зонах їх жорстко закріплених країв. Встановлено, що використання активаторів, за рахунок обґрунтованих інноваційних форм, підвищує довговічність віброрешіт на 8...24 %, порівняно з базовими решетами.

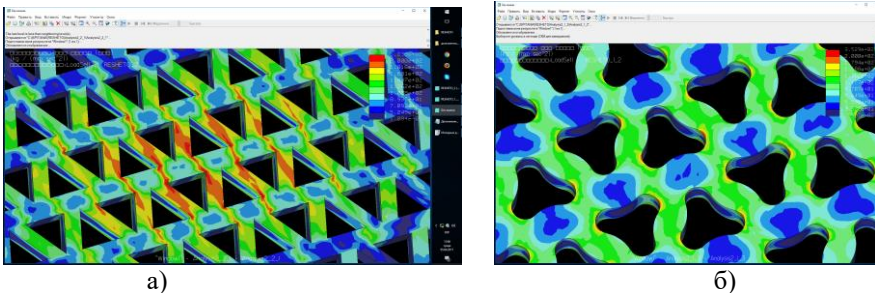
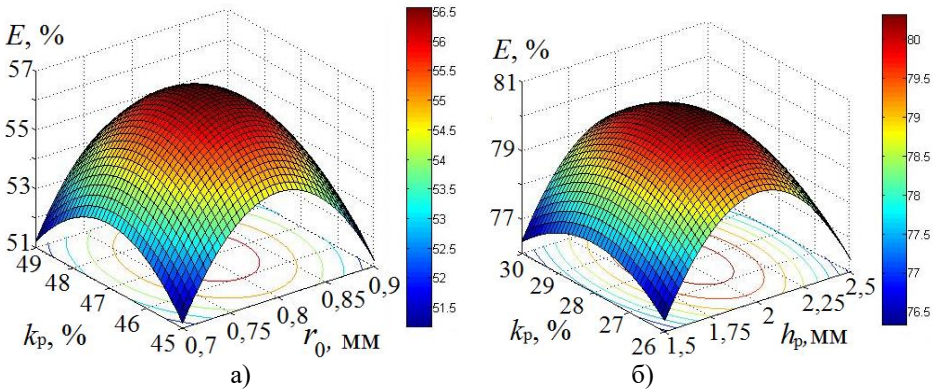


Рисунок 17 – Розподіл еквівалентних напружень на віброрешетах  
а – базові віброрешета; б – розроблені віброрешета з ТЕА

В результаті дослідження на екстремум рівняння регресії, що описують поверхню відгуку – повноту розділення ПП, встановлено раціональні значення найбільш значущих факторів (рис.18): для віброрешіт з ПЕА – радіус обертального кола епіциклоїди  $r_0=0,745...0,855$  мм; коефіцієнт живого перетину решета  $k_p=46...48$  %; площа отвору  $S_o=49,7...52,3$  мм<sup>2</sup>; для віброрешіт з ТЕА – радіус обертального кола епіциклоїди  $r_0=0,73...0,87$  мм; коефіцієнт живого перетину решета  $k_p=39,2...44,8$  %; площа отвору  $S_o=9,8...11,2$  мм<sup>2</sup>; для віброрешіт з ПОА – висота активатора  $h_p=1,7...2,3$  мм; коефіцієнт живого перетину решета  $k_p=26,4...29,6$  %; ширина активатора  $b_p=5,35...5,65$  мм.



а – ЗС гороху; б – ЗС кукурудзи

Рисунок 18 – Залежності повноти розділення ЗС від параметрів розроблених віброрешіт з активаторами

Отримані рівняння регресії ПП на розроблених віброрешетах у розкодованому вигляді для ЗС:

$$\begin{aligned}
 \text{а) гороху } E &= -3845 + 967,238 r_0 + 67,642 k_p + 71,475 S_o - \\
 &- 6,833 r_0 k_p - 3,959 r_0 S_o + 0,125 k_p S_o - 253,68 r_0^2 - 0,711 k_p^2 - 0,711 S_o^2; \\
 \text{б) гречки } E &= -330,4305 + 179,959 r_0 + 6,4133 k_p + 25,0093 S_o - \\
 &- 0,0832 r_0 k_p + 0,417 r_0 S_o - 112,01 r_0^2 - 0,0709 k_p^2 - 1,1326 S_o^2; \\
 \text{в) кукурудзи } E &= -298,3838 - 10,3054 h_p + 21,5116 k_p + 22,8968 b_p + \\
 &+ 1,6833 h_p k - 0,5 h_p b_p + 0,15415 k_p b_p - 8,8276 h_p^2 - 0,442875 k_p^2 - 2,0174 b_p^2.
 \end{aligned}$$

Повнота розділення при визначених конструктивних параметрах активаторів на плоских віброрешетах складала: з ПЕА при розділенні ЗС гороху  $E=55,7...56,6$  %, з ТЕА при розділенні ЗС гречки  $E=24,2...25$  %, з ПОА при розділенні ЗС кукурудзи  $E=78,5...80,2$  %. Експериментальною апробацією підтверджено адекватність математичних моделей гідродинаміки БПС з інтенсифікацією ПП на віброрешетах з активаторами (за критерієм Фішера з 95% вірогідністю).

**У шостому розділі** представлені результати виробничих випробувань модернізованих плоскорешітних та відцентрових вібраційних сепараторів, які одержані на агропідприємствах спільно з представниками заводів-виробників: ПАТ «Завод імені Фрунзе» (м. Харків) і СВТП «Механік» (м. Житомир).

Модернізація серійних вібраційних сепараторів передбачала заміну базових віброрешіт на розроблені з активаторами.

Виробничими випробуваннями підтверджено високу експлуатаційну ефективність і довговічність розроблених плоских і циліндричних віброрешіт, впроваджених в серійне виробництво та в комплектацію сепараторів. Застосування розроблених віброрешіт підвищило продуктивність ПП: на 25...55 % при розділенні ЗС гречки на решетах з ТЕА; на 23,8...95 % при розділенні ЗС зернобобових культур на решетах з ПЕА; на 30...35 % при розділенні ЗС кукурудзи на решетах з ПОА, що відповідає в цілому розробленій концепції інтенсифікації.

Встановлено, що інтенсифікація ПП за рахунок використання віброрешіт з активаторами супроводжується зниженням питомих енерго – та металозабезпеченостей на 24,3...47,1 % (сепаратор СВС-25), на 23,1...45,7 % (сепаратор Petkus К 218), відповідно (табл.1). Дані показники дозволяють підвищити якість аналізу витрат металу та енергії на ПП ЗС по відношенню до основного робочого органу – віброрешета.

Таблиця 1

### Енерго- та металозабезпеченість ПП ЗС

Показники	Тип сепаратора та решіт*					
	СВС-25 (відцентровий)			Petkus К 218 (плоскорешітний)		
	Δ/ТЕА	○/ПЕА	□/ПОА	Δ/ТЕА	○/ПЕА	□/ПОА
Питома продуктивність, т/(м <sup>2</sup> ·год)	0,9/1,3	2,8/5,3	2/2,7	0,55/0,83	1,1/2	0,6/0,77
Питома енергоємність, кВт год/т	4,07/2,76	1,28/0,68	1,77/1,34	0,68/0,45	0,34/0,19	0,63/0,48
Питома металомісткість, кг/(т год)	1000/676,5	315,1/166,7	434/328,6	454,6/303	227,3/123,5	416,7/322,6
Енергозабезпеченість ПП, кВт год / (м <sup>2</sup> т)	1,57/1,06	0,49/0,26	0,68/0,51	0,17/0,11	0,09/0,05	0,16/0,12
Металозабезпеченість ПП, т год / (м <sup>2</sup> т)	384,6/260,2	121,2/64,1	166,9/126,4	113,6/75,8	56,8/30,9	104,2/80,6

\*- віброрешета з Δ – трикутними, ○ – круглими та □ – прямокутними отворами

Отримано річний економічний ефект від впровадження:

– на СВК НПП «Росія» (Київська обл.) розроблених циліндричних решіт з ТЕА на вібровідцентровому сепараторі Р8-БЦСМ-50 при розділенні ЗС гречки – 31,2 тис. грн;

– на НДП «Центральне» ХНТУСГ (Харківська обл.) розроблених циліндричних решіт з активаторами на вібровідцентровому сепараторі СВС-25: при розділенні ЗС гречки – 21,5 тис. грн, ЗС кукурудзи – 15,3 тис. грн, ЗС нуту – 12,5 тис. грн, ЗС гороху – 26,1 тис. грн;

– на Шевченківському відділенні ТОВ «Гутянський елеватор» (Харківська обл.) розроблених циліндричних решіт з ПОА на вібровідцентровому сепараторі Р8-БЦСМ-50 при розділенні ЗС кукурудзи – 24,6 тис. грн;

– на НДП «Центральне» ХНТУСГ розроблених плоских віброрешіт з ТЕА на сепараторі ОС-4,5 при розділенні ЗС гречки – 19,7 тис. грн;

– на НДП «Центральне» ХНТУСГ розроблених плоских віброрешіт з ПЕА на сепараторі Petkus K 218: при розділенні ЗС нуту – 11,6 тис. грн; ЗС гороху – 23,8 тис. грн;

При впровадженні в серійне виробництво річний економічний ефект склав:

– на ПАТ «Завод імені Фрунзе» від розроблених плоских і циліндричних віброрешіт: з ПЕА для розділення ЗС зернобобових культур – 86 тис. грн; з ТЕА для ЗС гречки – 105 тис. грн; з ПОА для ЗС кукурудзи – 144 тис. грн;

– на СВТП «Механік» при комплектуванні вібровідцентрових сепараторів новими розробленими решетами: з ТЕА – 21,5 тис. грн; з ПЕА – 26,1 тис. грн; з ПОА – 15,3 тис. грн. Відповідно до програми випуску вібровідцентрових сепараторів – 1024 тис. грн.

Ефективність розроблених решіт з активаторами визнана європейськими компаніями «Fa. Biokorn» (Австрія) та «OÜ Karmeli» (Естонія) після придбання на ПАТ «Завод імені Фрунзе» у 2016 – 2017 рр. трьох партій та їх виробничої перевірки.

## ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення й вирішення наукової проблеми інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання ЗС, яке ґрунтується на теорії гідродинаміки бульбашкового псевдозрідженого середовища та становить основу для визначення закономірностей, розробки математичних моделей і методів оптимізації технологічних показників роботи вібраційних зернових сепараторів, що дозволило створити та обґрунтувати параметри плоских і циліндричних віброрешіт з активаторами, впровадити їх у серійне виробництво:

Основні наукові й прикладні результати досліджень:

1. На підставі комплексної оцінки і системного аналізу існуючих підходів до підвищення ефективності віброрешітного просіювання ЗС встановлено: відсутність загального погляду на моделювання динаміки сипких середовищ при їх моделюванні; математичні моделі ПП сипких середовищ спрощені щодо врахування параметрів отворів решіт та властивостей ЗС, які є неоднорідними та багатофазними; відсутність застосування та методів обґрунтування параметрів активаторів просіювання. Встановлено, що для моделювання динаміки ЗС на віброрешетах ефективно використовувати аналогії з максимальним наближенням до властивостей гідродинамічного бульбашкового псевдозрідженого середовища. Розробка науково-обґрунтованих методів і засобів активізації процесу розділення компонентів зернових сумішей дозволить підвищити продуктивність віброрешітного просіювання зерна.

2. Обґрунтовані принципи та розроблено концепцію інтенсифікації ПП ЗС на віброрешетах на базі створених дво- та тривимірних математичних моделей нелінійної динаміки БПС, яка дозволяє встановлювати поля швидкості ЗС при їх просіюванні на плоских та циліндричних віброрешетах, враховуючи властивості ЗС, їх неоднорідність, вплив параметрів активаторів просіювання різних типів.

3. Розроблені за модульним принципом дво- та тривимірні гідродинамічні моделі БПС, які імітують рух ЗС при їх просіюванні на плоскому віброрешеті, вперше дозволили встановити функціональні залежності складових швидкості ЗС з періодично-структурними, кінематичними параметрами віброрешіт з активаторами. Встановлено, що компоненти швидкості ЗС є періодичними функціями просторових змінних у площині структурного плоского віброрешета, а їх величини залежать від взаємного розташування і геометричних параметрів отворів віброрешета, що підтверджує можливість інтенсифікації ПП ЗС. Розв'язком моделей вперше отримані діапазони складових швидкостей ЗС і об'ємної продуктивності на базових віброрешетах та розроблених з активаторами об'ємного і епіциклоїдного типів. Встановлено, що використання активаторів на плоских віброрешетах підвищує вертикальні складові швидкості ЗС на 15,5...58,2% та продуктивність на 25...92,3%, порівняно з базовими решетами.

4. Розроблена тривимірна динамічна модель кільцевого шару ЗС при їх просіюванні на циліндричних віброрешетах вперше дозволила визначити складові швидкості БПС як функції від конструктивно-кінематичних параметрів решіт і активаторів просіювання різних типів, властивостей ЗС. Отримано діапазони варіювання складових швидкостей ЗС та сходової, проходової і загальної об'ємних продуктивностей, в залежності від значущих параметрів ПП: концентрації бульбашок та швидкості проходження БПС через отвори віброрешіт. Встановлені залежності радіальних складових швидкості ЗС від швидкості їх проходження через отвори віброрешіт та коефіцієнта концентрації бульбашок, які визначають інтенсивність процесу просіювання. Також встановлено, що використання активаторів на циліндричних віброрешетах підвищує їх продуктивність на 38,5...95%, порівняно з базовими решетами.

5. Запропонований метод розрахунку ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості ЗС, який є основою розроблених гідродинамічних моделей ПП ЗС на плоских і циліндричних віброрешетах, на відміну від існуючих методів об'єктивно враховує властивості БПС. За визначеними закономірностями зміни ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості ЗС встановлені відповідні діапазони значень на віброрешетах з активаторами при розділенні ЗС: гороху – 0,04...0,074 Па·с, гречки – 0,009...0,026 Па·с, кукурудзи – 0,067...0,098 Па·с.

6. Розроблені віброрешета з активаторами пройшли випробування на надійність. За допомогою методу скінченних елементів, на основі програмного продукту Pro/ENGINEER і даних експериментальних досліджень, встановлено закономірності зміни еквівалентних напружень та довговічності віброрешіт, які враховують параметри активаторів, завантаження та властивості ЗС. Встановлено, що використання активаторів, за рахунок обґрунтованих інноваційних форм, підвищує довговічність віброрешіт на 8...24%, порівняно з базовими.

7. Розроблено рекомендації щодо визначення програмованої ефективності ПП на віброрешетах з активаторами, які враховують коефіцієнти форми насінин ЗС. За розробленим методом визначено коефіцієнти форми насіння ЗС, що досліджувались: гороху – 0,89...0,93; нуту – 0,78; кукурудзи – 1,65...2,08. Отримані



функціональні залежності повноти розділення ЗС від коефіцієнтів форми їх насінин дозволяють прогнозувати і керувати ефективністю ПП на віброрешетах.

8. В результаті проведення багатофакторного експерименту ПП ЗС рекомендовані наступні раціональні значення конструктивних параметрів активаторів віброрешіт: ПЕА –  $r_0=0,745\dots0,855$  мм;  $S_0=49,7\dots52,3$  мм<sup>2</sup>;  $k_p=46\dots48$  %; ТЕА –  $r_0=0,73\dots0,87$  мм;  $k_p=39,2\dots44,8$  %;  $S_0=9,8\dots11,2$  мм<sup>2</sup>; ПОА –  $h_p=1,7\dots2,3$  мм;  $k_p=26,4\dots29,6$  %;  $b_p=5,35\dots5,65$  мм. Повнота розділення, при визначених параметрах активаторів на плоских віброрешетах, складала: з ПЕА при розділенні ЗС гороху  $E=55,7\dots56,6$  %, з ТЕА при ЗС гречки –  $E=24,2\dots25$  %, з ПОА при ЗС кукурудзи –  $E=78,5\dots80,2$  %. Застосування розроблених віброрешіт підвищило продуктивність ПП: на 25...55 % при розділенні ЗС гречки на решетах з ТЕА; на 23,8...95 % при розділенні ЗС зернобобових культур на решетах з ПЕА; на 30...35 % при розділенні ЗС кукурудзи на решетах з ПОА.

9. Обробка результатів теоретичних і експериментальних досліджень показала наступну розбіжність: до 3,5 % при визначенні складових швидкості ЗС на віброрешетах та до 3 % при визначенні продуктивності ПП, що підтверджує адекватність розроблених наукових положень.

10. За результатами досліджень розроблено нормативну документацію на решета з активаторами, яка впроваджена та використовується в серійному виробництві на ПАТ «Завод імені Фрунзе», при комплектуванні сепараторів на СВТП «Механік». Виробничими випробуваннями підтверджена висока ефективність розроблених плоских і циліндричних віброрешіт з активаторами. Визначено, що інтенсифікація ПП, за рахунок використання решіт з активаторами, супроводжується зниженням питомих енерго- та металозабезпеченостей ПП ЗС на 24,3...47,1 % (сепаратор СВС-25), на 23,1...45,7 % (сепаратор Petkus K 218), відповідно.

Від застосування на СВК НПП «Росія» (Київська обл.), НДП «Центральне» ХНТУСГ, Шевченківському відділенні ТОВ «Гутянський елеватор» (Харківська обл.) розроблених плоских і циліндричних віброрешіт з активаторами отримано загальний річний економічний ефект 186,3 тис. грн.

Впровадження в серійне виробництво на ПАТ «Завод імені Фрунзе» розроблених решіт з активаторами дає загальний річний економічний ефект – 335 тис. грн. Впровадження на СВТП «Механік», шляхом комплектування вібровідцентрових сепараторів розробленими решетами з активаторами, дає загальний річний економічний ефект – 1024 тис. грн.

Ефективність розроблених решіт з активаторами визнана європейськими компаніями «Fa.Biokorn» (Австрія) та «OÜ Karmeli» (Естонія) після придбання на ПАТ «Завод імені Фрунзе» у 2016 – 2017 рр. трьох партій та їх виробничої перевірки.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография / Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А. и др. Харьков: Міськдрук, 2010. 360 с.

2. Технологічні карти вирощування сільськогосподарських культур: монографія / Тищенко Л.М., Корнієнко С.І., Харченко С.О. та ін.; за ред. Л.М. Тищенка. Харків: ХНТУСГ, 2015. 273 с.

3. Kharchenko S.O. Intensification of grain sifting on flat sieves of vibration grain separators. Kharkiv: «Dіca+», 2017. 220 p.

4. Теорія сепарування зерна: монографія / Ольшанський В.П., Бредихін В.В., Лукьяненко В.М., Півень М.В., Сліпченко М.В., Харченко С.О. Харків: Планета-Прінт, 2017. 803 с.

5. Тищенко Л.Н., Півень М.В., Харченко С.А. Исследование закономерностей пористости зерновых смесей при сепарировании плоскими вибрационными решетками. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ*. 2007. Вип. 58. С. 22 – 29.

6. Исследования послыонного движения зерновых смесей на плоских вибрационных решетках / Тищенко Л.Н., Миняйло А.В., Півень М.В., Харченко С.А. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2007. Вип. 59. С. 69 – 76.

7. Исследование закономерностей вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными решетками / Тищенко Л.Н., Півень М.В., Харченко С.А., Бредихин В.В. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСГ*. 2009. Вип. 88. С. 34 – 43.

8. Харченко С.А., Тищенко Л.Н. Алгоритм расчета эффективного коэффициента динамической вязкости пузырьковой псевдожидкости, моделирующей сепарируемую зерновую смесь. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. №2 (70). С.64 – 72.

9. Харченко С.А. Построение решений уравнений динамики зерновых смесей на плоских виброрешетах. *Конструювання, виробництво та експлуатація с.г. машин: Вісник КНТУ*. 2013. Вип.43, ч.ІІ. С. 287 – 292.

10. Результаты производственных испытаний зернового сепаратора А1-БЦСМ-100 с разработанными решетками / Тищенко Л.Н., Півень М.В., Харченко С.А., Бредихин В.В. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2013. Вип.135. С. 9 – 15.

11. Харченко С.А. К построению уравнений динамики стационарных потоков в псевдооживленном зерновом слое на структурных виброрешетах. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. Харків: ХНТУСГ, 2014. Вип.148. С.181 – 186.

12. Харченко С.А. К построению трехмерной гидродинамической модели динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному виброрешету. *Праці ТДАТУ*. Мелітополь, 2014. Вип.14. Т.2. С. 80 – 85.

13. Харченко С.А., Тищенко Л.Н. Уточнение уравнений динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному виброрешету. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2014. №1 (73). С. 50 – 53.

14. Харченко С.А. К решению уравнений динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету. *Сучасні*

напрями технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: *Вісник ХНТУСГ*. 2014. Вип.152. С. 109 – 114.

15. Моделирование динамики зерновой смеси при сепарировании на рифленном решете вибросепаратора / Тищенко Л.Н., Олышанский В.П., Харченко Ф.М., Харченко С.А. *Інженерія природокористування*. Харків, 2014. № 2 (2). С. 54 – 61.

16. Тищенко Л.Н., Харченко С.А., Абдуев М.М. К построению модели динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип.156. С. 168 – 174.

17. Харченко С.А. К разработке гидродинамической модели движения зерновой смеси по цилиндрическому решету виброцентробежных сепараторов. *Ресурсозберігаючі технології, матеріали та обладнання у ремонтному виробництві: Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 158. С. 198 – 203.

18. Харченко С.А. Математические выражения модели динамики пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету. *Технічні системи і технології тваринництва: Вісник ХНТУСГ*. 2015. Вип. 157. С. 226 – 230.

19. Харченко С.А., Тищенко Л.Н. Определение абсолютных компонент скоростей пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси при движении по цилиндрическим решетам виброцентробежных сепараторов. *Інженерія природокористування*. Харків, 2015. № 2 (4). С. 52 – 57.

20. Осесимметричные колебания кольцевого зернового слоя при движении по структурному решету / Харченко С.А. та ін. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2016. №4. С. 44 – 50.

21. Експериментальне визначення швидкості проходження зернової суміші кукурудзи крізь отвори виброрешет зернових сепараторів / Тищенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2016. Вип.173. С.83 – 92.

22. Спосіб підвищення ефективності просіювання насінневих сумішей гарбузу та кабачків на решетах / Тищенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *Інженерія природокористування*. Харків, 2016. № 1 (5). С. 80 – 87.

23. Тищенко Л.Н., Харченко С.А. Инновационные решения повышения эффективности виброрешетной просеиваемости зерновых смесей. *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця: ВНАУ, 2016. №2 (82). С. 116 – 124.

24. Харченко С.А. Методика определения энергозатрат процессов виброрешетного просеивания зерновых смесей. *Вісник СНАУ*. Суми: СНАУ, 2016. 10/2 (30). С.137 – 142.

25. Тищенко Л., Харченко С. К применению методов механики сплошных сред для описания движения зерновых смесей на виброрешетах. *MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin-Rzeszow, 2013. Vol.15, №7. P. 94 – 99.

26. Харченко С., Тищенко Л., Харченко Ф. Решение уравнений динамики псевдооживленных зерновых смесей на структурных виброрешетах. *MOTROL*.

*Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. Lublin-Rzeszow, 2014. Vol.16, №7. P. 111 – 117.

27. Харченко С.А. К исследованию осесимметричных колебаний кольцевого зернового слоя при движении по структурному цилиндрическому решету. *Молодой ученый*. Казань, 2015. №7 (87). С. 1091 – 1096.

28. Харченко С., Тищенко Л., Борхаленко Ю. Теория осесимметрических движений кольцевого зернового слоя внутри цилиндрического виброрешета. *MOTROL «Motorization and power industry in agriculture»*. Lublin-Rzeszow, 2015. Vol. 17, №7. P. 73 – 81.

29. Харченко С.А. Моделирование движения пузырьковой псевдооживленной зерновой смеси по структурному трехмерному виброрешету. *Mechanization in agriculture*. София, 2015. Т.5. С.9 – 14.

30. Kharchenko S. Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin-Rzeszow, 2015. Vol.15, № 3. P. 87 – 93.

31. Идентификация скорости прохождения частиц зерновой смеси через отверстия решет вибрационных зерновых сепараторов / Тищенко Л.Н., Харченко С.А. та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Харків, 2016. № 2/7 (80). С. 63 – 70.

32. About motion of grain mixture of variable porosity in the cylindrical sieve of vibrocentrifuge / Olshanskii V., Olshanskii A., Kharchenko S., Kharchenko F. *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol.16, № 3. P. 31 – 35.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

33. Харченко С.А. Повышение эффективности сепарации зерновых смесей на решетках с отверстиями эллипсоидной формы. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: матеріали ІХ Міжнар. наук.-практ. конф. вип.1*. Кіровоград: КНТУ, 2013. С.120 – 122.

34. Харченко С.А. Результаты математического моделирования динамики псевдооживленной зерновой смеси на плоском структурном виброрешете. *Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК: Вестник БГАУ*, 2014. Секция 2. С. 251 – 258.

35. Харченко С.А., Тищенко Л.Н. Интенсификация процесса просеивания зерновых смесей на плоских и цилиндрических решетках зерновых сепараторов. *Материалы международной студенческой научной конференции*. Белгород: БГАУ имени В.Я. Горина, 2015. С. 96.

36. Харченко С.О. Теорія просіювання зернових сумішей через отвори плоских віброрешіт. *Розумна агротехніка для ефективного землеробства: матеріали Міжнар. наук.-практ. конференції-форуму*. Харків: ХНТУСГ, 2016. С. 55 – 57.

37. Харченко С.О. Апробація розроблених решіт з активаторами у виробничих умовах. *Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів (присвяченій 40-річчю Сумського НАУ)*. В 3 т./Т.ІІІ. Суми, 2017. С.68.

38. Харченко С.О. Дослідження довговічності віброрешіт при інтенсифікації процесів просіювання зернових сумішей. *Вібрації в техніці та технологіях*: зб. тез доповідей XVI Міжнар. наук.-практ. конф. Вінниця, 26-27.10.2017. С.143 – 146.

Праці, які додатково відображують наукові результати дисертації:

39. Спосіб сепарації насінневих сумішей на перфорованих робочих поверхнях: пат. 62953 У Україна: МПК В07В 1/00. №и 2011 01339; заявл. 07.02.11; опубл. 26.09.2011, Бюл. №18.

40. Решето з прямокутними отворами, що самоочищається: пат. 68034 У Україна: МПК В02С 4/00, В07В1/00. № и 2011 10727; заявл. 06.09.11; опубл. 12.03.2012, Бюл. №5.

41. Решето з прямокутними отворами: пат. 55286 У Україна: МПК В07В 1/00, А01В 76/00. № и 2010 06635; заявл. 31.05.10; опубл. 10.12.2010, Бюл. №23.

42. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах: пат. 50874 У Україна: МПК В07В 1/00. № и 2009 13683; заявл. 28.12.09; опубл. 25.06.2010, Бюл. № 12.

43. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штампованих решетах: пат. 58042 У Україна, МПК В07В 1/28. № и 2010 11203; заявл. 20.09.10; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6.

44. Спосіб сепарації насінневих сумішей на решетах з прямокутними отворами: пат. 62438 У Україна, МПК В07В 1/00. № и 2011 02049; заявл. 21.02.11; опубл. 25.08.2011, Бюл. № 16.

45. Решето для сепарації насіння гречки: пат. 101890 У Україна, МПК В07В 1/46. № и 2015 01887; заявл. 03.03.15; опубл. 12.10.2015, Бюл. №19.

46. Спосіб визначення розмірів насіння: пат. 101069 У Україна, МПК G01В 11/00, G01В 11/02. № и 2015 01890; заявл.03.03.15; опубл. 25.08.2015, Бюл.№16.

47. Нові можливості при сепаруванні насіння кукурудзи / Тіщенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *Посібник українського хлібороба. Селекція і насінництво польових культур*. 2012. Т.2. С. 338 – 339.

48. Нові решета для сепарації гречки / Тіщенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *The Ukrainian Farmer*. 2012. №7. С. 78 – 79.

49. Удосконалення сепарації гречки / Тіщенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *The Ukrainian Farmer*. 2013. № 9(46). С. 102 – 103.

50. Ефективна сепарація гречки на вібровідцентрових сепараторах / Тіщенко Л.М., Харченко С.О. та ін. *Хранение и переработка зерна*. Київ, 2013. №10 (175). С. 31 – 33.

51. Тіщенко Л. Сепарація гороху та нуту / Тіщенко Л., Харченко С. та ін. *The Ukrainian Farmer*. 2014. №4. С. 94 – 95.

52. Нові можливості сепарації та калібрування зерна / Тіщенко Л., Харченко С. та ін. *Пропозиція*. 2015. №11. С. 110 – 118.

53. Нові можливості сепарації та калібрування зерна / Тіщенко Л., Харченко С. та ін. *Пропозиція*. 2015. №12. С. 108 – 115.

54. Нові можливості сепарації та калібрування зерна. Очищення та калібрування кукурудзи / Тіщенко Л., Харченко С. та ін. *Пропозиція*. 2016. №1. С.94 – 98.

## АНОТАЦІЯ

**Харченко С.О.** Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

У дисертації вирішено науково-технічну проблему – підвищення продуктивності віброрешітного просіювання зерна при їх післязбиральній обробці. Запропоновано концепцію інтенсифікації процесів просіювання на віброрешетах, яка ґрунтується на гідродинамічній аналогії руху зернових сумішей з динамікою бульбашкового псевдозрідженого середовища і використанні активаторів. Розроблено математичні моделі динамічних процесів на плоских і циліндричних віброрешетах, в яких, за модульним принципом, враховано вплив параметрів отворів і активаторів, властивостей зернових сумішей. Розроблені решета з епіциклоїдними та об'ємними активаторами пройшли виробничу апробацію, впроваджені в серійне виробництво та комплектування вібраційних зернових сепараторів. Продуктивність вібраційних сепараторів збільшена на 23,8...95 %.

**Ключові слова:** процеси просіювання, вібраційні решета, зернові суміші, інтенсифікація, продуктивність, повнота розділення.

## АННОТАЦИЯ

**Харченко С.А.** Концепция интенсификации процессов виброрешетного просеивания зерновых смесей. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

В диссертации решена научно-техническая проблема – повышения производительности виброрешетного просеивания зерновых смесей при их послеуборочной обработке. Предложена концепция интенсификации процессов просеивания на виброрешетах, основанная на гидродинамической аналогии движения зерновых смесей с динамикой пузырьковой псевдооживленной среды и применении активаторов. Разработаны математические модели динамических процессов на плоских и цилиндрических виброрешетах, в которых, по модульному принципу, учтены параметры отверстий и активаторов, свойств зерновых смесей. Разработанные решета с эписциклоидными, объемными активаторами прошли производственную апробацию, внедрены в серийное производство и комплектацию вибрационных зерновых сепараторов. Производительность вибрационных сепараторов увеличена на 23,8...95%.

**Ключевые слова:** процессы просеивания, вибрационные решета, зерновые смеси, интенсификация, производительность, полнота разделения.

### ABSTRACT

**Kharchenko S.A.** Conception of intensification of processes of the vibrosieve sifting of grain mixes. – Manuscript.

The thesis for the degree of doctor of technical sciences, specialty 05.05.11 – Machines and means of mechanization of agricultural production. – Kharkiv Petro Vasylenko National Technical University of Agriculture, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The thesis is devoted to solution of current scientific and practical problem of increase in productivity of vibrosieve sifting of grain mixes which is defining for its postharvest processing efficiency.

On the basis of complex assessment and system analysis of existing approaches perspective direction of increase in efficiency of vibrosieve sifting grain mixes by use of activators is reasonable.

The offered concept of intensification of sifting processes on vibrosieves from different geometry of openings based on hydrodynamic analogy of movement grain mixes to movement of vesiculate fluidized medium. The created two and three-dimensional mathematical models of nonlinear dynamics of vesiculate fluidized medium by means of which fields of speed of grain mixes at its sifting on flat and cylindrical vibrosieves are established. In models are considered grain mixes properties, its heterogeneity, constructive and kinematic parameters of vibrosieves, including parameters of activators of sifting of three- and five-petal epicycloid, volume types.

Dynamic models of processes of sifting of grain mixes on plane vibrosieves are developed by modular principle. Models are based on creation of solutions of non-linear Navier-Stokes equations by method of successive approximations. It is set that speed components of grain mixes are periodic functions of space variables in plane of plane vibrosieve and its values depend on relative positioning and geometrical parameters of openings of vibrosieve. Use of activators on plane vibrosieves increases its productivity on 25...92,3 % in comparison with basic sieves that confirms intensification of process of grain mixes sifting.

The speeds components of vesiculate fluidized medium as functions from constructive and kinematic parameters of sieves with activators, grain mixes properties for the first time are determined by developed three-dimensional dynamic model of annular layer of grain mixes at its sifting on cylindrical vibrosieves. The received ranges of variation of speeds components of grain mixes and productivities depending on significant parameters of sifting processes of: vibrosieves concentration of bubbles in mix and speed of its passing through openings. Dependences of radial speed components of grain mixes on speed of its passing through openings are established vibrosieves also coefficient of concentration of bubbles which define intensity of sifting processes. Use of developed cylindrical vibrosieves with activators increases its productivity on 38,5...95 % in comparison with basic.

Functional dependences of speed components of grain mixes with periodic and structural, kinematic parameters of flat and cylindrical vibrosieves with activators which determine productivity and quality of sifting processes on grain separators are received.

The offered method of calculation of effective coefficient of dynamic viscosity of grain mixes which is basis of developed hydrodynamic models of process of its sifting on flat and cylindrical vibrosieves and in difference from existing methods objectively considers vesiculate fluidized medium properties. On determined by regularities of change of effective coefficient of dynamic viscosity of mix corresponding ranges of values on vibrosieves with activators at division of peas grain mixes, buckwheat and corn are established.

The developed vibrosieves with activators have passed fail-safe tests. By means of finite element method on basis of Pro/ENGINEER software product and these experimental researches dependences of equivalent tension and durability are established vibrosieve, considering parameters of activators, loadings and grain mixes properties. It is established that use of activators, at expense of reasonable innovative forms, increase durability vibrosieve on 8...24% in comparison with basic.

Recommendations about determination of programmable efficiency of sifting processes on vibrosieves with activators which consider coefficients of grain mixes forms and parameters of developed sieves are developed. Coefficients of seeds forms of peas grain mixes, chick-pea and corn are defined. The received functional dependences of completeness of division of grain mixes on coefficients of form of its seeds allow predicting and operating efficiency of sifting processes on vibrosieves.

The system analysis of dependences of criteria of optimization of sifting processes on constructive and kinematic parameters vibrosieves also physic-mechanical characteristics of grain mixes, certain rational parameters of activators of various types. Use of developed vibrosieves with activators in certain parameters increases productivity of separators on 23,8...95% at division of buckwheat grain mixes, leguminous cultures and corn.

Experimental researches production approbation at agroenterprises of Ukraine and Europe has confirmed reliability of concept of intensification of vibrosieve sifting processes of grain mixes and adequacy of developed mathematical models.

By results of researches standard documentation on sieves with activators which is introduced is developed and it is used in mass production at machine-building enterprises of Ukraine.

**Key words:** sifting processes, vibrating sieves, grain mixtures, intensification, capacity, completeness of the separation.