

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОЩАДЛИВОЇ ПІДГОТОВКИ
НАСІННЯ З ПОЛПШЕНИМ БІОЛОГІЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ**



**В. В. БРЕДИХІН, О. В. БОГОМОЛОВ,
М. В. СЛІПЧЕНКО, Л. В. КІСЬ-КОРКІЩЕНКО,
С. Г. ІВАЩЕНКО, В. І. ІРКЛІЄНКО, О. О. ЧЕРНЯЄВ,
С. Р. ТІКУНОВ**

**НАУКОВІ ОСНОВИ
ОЩАДЛИВОЇ ПІДГОТОВКИ
НАСІННЯ З ПОЛПШЕНИМ
БІОЛОГІЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ**

Монографія

**В. В. БРЕДИХІН, О. В. БОГОМОЛОВ, М. В. СЛІПЧЕНКО,
Л. В. КІСЬ-КОРКІЩЕНКО, С. Г. ІВАЩЕНКО, В. І. ІРКЛІЄНКО,
О. О. ЧЕРНЯЄВ, С. Р. ТІКУНОВ**

НАУКОВІ ОСНОВИ ОЩАДЛИВОЇ ПІДГОТОВКИ НАСІННЯ З ПОЛІПШЕНИМ БІОЛОГІЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ

Монографія

**Дослідження виконано в рамках науково-дослідної тематики,
що виконується за державним замовленням «Підвищення
продовольчої безпеки з розробкою конкурентоспроможних технологій
одержання якісного насіння з поліпшеним біопотенціалом»
(0122U000810) з 01.01.2022 по 31.12.2023.**

Матеріали досліджень, які викладено у монографії успішно пройшли
перевірку на унікальність та не містять плагіату.

Харків
«Діса+»
2023

УДК 631.362

НЗ4

*Затверджено Вченою Радою Державного біотехнологічного університету
протокол № 9 від 16.05.2023 р.*

Рецензенти:

*д.т.н., професор О.І. Завгородній (Державний біотехнологічний університет,
м Харків).*

*д.т.н., професор О.В. Цуркан (директор ВСП Ладижинський фаховий коледж
Вінницького НАУ)*

Колектив авторів:

*В. В. Бредихін, О. В. Богомолів, М. В. Сліпченко, Л. В. Кісь-Коркіщенко, С. Г. Івашенко,
В. І. Ірклієнко, О. О. Черняєв, С. Р. Тікунов*

Бредихін В. В.

НЗ4 Наукові основи ошадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом : монографія / Бредихін В. В., Богомолів О. В., Сліпченко М. В. та ін. – Харків: Діса+, 2023. – 408 с. Іл. – 165. Табл. – 33. Бібл. назв. – 331. – Українською мовою.

ISBN 978-617-8122-38-6

У монографії представлено наукові основи визначальних етапів ошадливого виробництва насіння з поліпшеним біологічним потенціалом. Розроблено математичні моделі процесів: завантаження ковшів зернових норій; нелінійної динаміки багатозафазного серидовища на тарілчастому розкидачі вібровідцентрового сепаратора; розділення насінневих матеріалів за густиною насіння у пневморозрідженому шарі насіння та за пружними властивостями. Представлено технічні аспекти калібрування насінневого матеріалу решетами з отворами у формі овалу Кассіні.

Для науковців, фахівців та здобувачів освіти, які займаються розрахунком, проектуванням, виготовленням та експлуатацією машин і обладнання для післязбиральної обробки зерна.

The monograph presents the scientific foundations of the determinant stages in with low seed damage production of seeds with improved biological potential. Mathematical models of the following processes have been developed: loading buckets of grain elevator; nonlinear dynamics of a multiphase medium on a plate spreader of a vibrocentrifugal separator; separation of seed materials by seed density in the pneumatically rarefied seed layer and by elastic properties. The technical aspects of calibrating seed material by means of the sieves with holes in the shape of the Cassini oval have been presented.

The publication is intended for scientists, specialists and students who are engaged in the calculation, design, manufacture and operation of machines and equipments for post-harvest processing of grain.

УДК 631.362

© Бредихін В. В., Богомолів О. В.,
Сліпченко М. В., Кісь-Коркіщенко Л. В.,
Івашенко С. Г., Ірклієнко В. І.,
Черняєв О. О., Тікунов С. Р., 2023

© Оформлення. Діса+, 2023

ISBN 978-617-8122-38-6

ВСТУП

Стале забезпечення національної харчової безпеки України залежить від збільшення валового об'єму зернових культур. Прогнозований зріст задовольнить запит на постачання продуктів харчування населення не тільки України, а і Світу. Збільшення площі земель під зернові культури на сьогодні практично неможливе, за даним [1] розораність земель України найбільша в світі і сягає 80%.

У наслідок широкомасштабної військової агресії та бойових дій, які ведуться на близько 34% території України, страждають верхні найродючіші шари ґрунтів, які відновлюються найповільніше – один сантиметр за сто років [2]. Відповідно, частка родючих земель, що деградують збільшилась на 13% [3].

Урожайність зернових культур в Україні у 2022 році наближається до 43,4 ц/га і значно поступається урожайності Європейських країн, де вона досягає 80 ц/га [4].

Відповідно статистичним даним Міністерства аграрної політики України за 2022 рік, лише 30% насінневого матеріалу задовольняє вимогам ДСТУ. У провідних країнах Світу цей показник досягає 95% [4].

Необхідність покращення якісних і кількісних характеристик процесу підготовки насінневого матеріалу з підвищеним біологічним потенціалом регламентовано жорсткими вимогами, які висувають до зернових і, особливо, насінневих матеріалів закордонні покупці сільськогосподарської продукції. У січні-серпні 2022 року Україна експортувала понад 20 млн. т. зернових культур, що на 25% менше, ніж за аналогічний період 2021 року. За вісім місяців 2022 року за кордон було продано 4,1 млн т пшениці (1,2 млрд дол. США), кукурудзи – 15,1 млн т (3,8 млрд дол. США), ячменю – 0,8 млн т (0,2 млрд дол. США). Найбільшими покупцями українського зерна у січні-серпні 2022 року, як і раніше, були країни Азії, Євросоюзу та Африки [5].

На якість насіннєвого матеріалу суттєво впливають агроекологічні та технічні і технологічні чинники протягом усього процесу підготовки насіння, починаючи від підготовки ґрунту, своєчасного виконання агротехнологічних операцій під час вирощування, збирання, обробки та завершуючи завантаженням на зберіганням. Визначальний вплив на отримання якісного насіння відбувається на етапі післязбиральної обробки. Кінцевою метою якого є отримання зернівок, що мають найвищу енергію росту та польову схожість, а отже можуть забезпечити збільшення майбутнього врожаю. Протягом усього процесу підготовки насіння відбувається багаторазова взаємодія зернівок з робочими органами машин і обладнання, що призводить до травмування частини насіннєвого матеріалу.

Отримання насіння найвищої якості з мінімальним відсотком травмованих зернівок поряд з його обробкою фізичними полями різної природи дозволяє отримати насіннєвий матеріал з поліпшеним біологічним потенціалом.

Якість процесу підготовки насіннєвого матеріалу залежить від ефективності машин і обладнання, що реалізують процес. До технологічного обладнання висуваються жорсткі вимоги з ресурсозбереження та ощадливої взаємодії робочих органів машин з частинками насіннєвого матеріалу.

Основною проміжною технологічною операцією з підготовки насіннєвого матеріалу є його транспортування. Транспортування, в залежності від розробленої технологічної лінії, відбувається стрічковими, скребковими, ковшовими, шнековими транспортерами та пневмотранспортуючими машинами. Під час багаторазової взаємодії зернівок з робочими органами транспортуючих машин, відбувається мікро та макро- травмування зернівок, що значно знижує біологічний потенціал насіння, його енергію проростання та урожайність.

Для транспортування насіннєвого матеріалу у вертикальному напрямку використовують ковшові елеватори (норії). За інформацією [6], до 60 % травмування зернівок відбувається під час завантаження та розвантаження

ковшів норій. Особливо небезпечним для зернівок є саме етап розвантаження, який відбувається на високих швидкостях та під дією відцентрової сили та сили тяжіння. Але, з огляду на те, що транспортування норіями є одним з найбільш поширених, ефективних і економічно обгрунтованих способів, то виникає задача із розробки технічних засобів із суттєвого зниження травмування зерна на цьому етапі.

Науковим дослідженням ошадливого завантаження і розвантаження ковшів норій присвячено роботи: І.П. Прокоф'єва [7], Г.І. Дерсевича [8], П.Н. Платонова [9], М.С. Бернштейна [10], Є.О. Дженике [11] та ін.

В роботі авторського колективу монографії розглянуто процес ошадливого розвантажування ковшів норій.

Під час первинної обробки насіннєвого матеріалу, сепарація відбувається за розмірними характеристиками зернівок. Механіко-технологічному обгрунтуванню параметрів процесу сепарації матеріалу крізь отвори решіт та розробці і модернізації універсальних сепараторів присвячено роботи: Е.С. Гончарова [12, 13], В.В. Гортинського [14, 15], Б.І. Котова [16], Д.І. Мазоренка [17, 18], В.М. Дринчі [19], П.М. Василенка [20], П.М. Заїки [21, 22], О.І. Завгороднього [23], Л.М. Тіщенка [24, 25], М.В. Півня [26], С.О. Харченка [27, 28], С.П. Степаненка [29] та ін.

Розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння дозволяє виділити з насіннєвої маси, зернівки з підвищеним біологічним потенціалом. Процеси сепарації насіннєвого матеріалу за густиною насіння досліджували: А.М. Прилуцький [30], С.І. Малюта [31], Б.І. Котов [32], Д.В. Богатирьов [33] та ін.

Однак, методи та технічні засоби, що використовуються, не в достатній мірі задовольняють сучасним вимогам до продуктивності та якості процесу. Машина і обладнання, що виконують процес, значно травмують насіннєвий матеріал, що суттєво знижує його біологічний потенціал.

Найбільший вплив на отримання якісного насінневого матеріалу з покращеним біологічним потенціалом та мінімальною травмованістю мають етапи післязбиральної обробки, що розглянуті у монографії.

Визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів машин і обладнання для післязбиральної обробки, що є оптимумом між їх продуктивністю та ефективністю із врахуванням травмованості насіння є актуальною науковою задачею. Таким чином, наукові дослідження з підвищення ефективності машин і обладнання, що реалізують процес підготовки насінневого матеріалу та зниження ступеню травмованості зернівок, дозволить поліпшити біологічний потенціал насіння, покращити енергію проростання, схожість, урожайність та збільшити валовий об'єм виробництва зернових культур.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО ВСТУПУ

1. Науково-аналітична записка «Інституційне забезпечення контролю екологічного стану ґрунтів в Україні: проблеми, шляхи вирішення». Інститут регіональних досліджень імені М.І. Долишнього НАН України». Львів, 2021. 16 с.
2. Назаренко І.І., Польчина С.М., Нікорич В.А. Ґрунтознавство. Підручник. Чернівці, 2004. 401 с.
3. Звіт Державного агентства з меліорації та рибного господарства. Київ, 2022. 35 с.
4. Звіт Міністерства аграрної політики та продовольства України. Київ, 2022. // URL: <https://minagro.gov.ua/investoram/monitoring-stanu-apk/eksport-z-ukrayini-zernovih-zernobobovih-ta-boroshna> (дата звернення 19.02.2023).
5. Звіт Міністерства економіки України. Київ, 2022 <https://www.me.gov.ua/?lang=uk-UA> (дата звернення 06.05.2023).
6. Дерев'янюк Д.А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння. Житомир, 2015. 773 с.

7. Прокофьев Н. М. Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок. М.: ОНТИ Гостройиздат, 1963. 260 с.
8. Дерсевич Г. И. Механика зернистой среды. Проблемы механики. М. Вып. III. 1961. 368 с.
9. Платонов П. М. Исследование движения зерновых потоков: автореферат диссерт. докт. тех. наук. Московский технологический институт пищевой промышленности. 1960. 27 с.
10. Бернштейн М. С. О статических свойствах несвязного сыпучего тела в предельном равновесии. Массивные и стержневые конструкции. Госиздат литературы по строительству и архитектуре, 1952. 128 с.
11. Дженике Э. О. Складирование и выпуск сыпучих материалов. М.: Мир. 1968. 164 с.
12. Гончаров Е.С. Исследование процесса сепарации зерновых материалов центробежно-вибрационными решетками: автореф. дис. канд. техн. Наук: 05.20.01. ВИМ. М., 1986. 34 с.
13. Гончаров Е.С. Механико-технологическое обоснование и разработка универсальных виброцентробежных зерновых сепараторов: Автореф. дис. докт. техн. наук: 05.20.01. ВИМ. –1986 – 34 с.
14. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях М.: Колос, 1980. 304 с.
15. Гортинский В.В. Сортирование сыпучих тел при их послойном движении по ситам. Труды ВИМ. М.: ВИМ, 1964. Т.34. С. 121-191.
16. Котов Б.І., Степаненко С.П., Пастушенко М.Г. Дослідження шляхів підвищення ефективності віброрешітних сепараторів зерна і насіння. Вибрації в техніці і технологіях. 2004. №3 (35). С. 61 – 63.
17. Мазоренко Д.И. Повышение эффективности работы виброцентробежных сепараторов на основе определения их рациональных схем и параметров // Вибрации в технике и технологиях. 2003. №6(32). С. 3 – 12.

18. Мазоренко Д.И. Теоретические и экспериментальные исследования вибрационно-центробежного сепаратора с пространственным движением оси вращения ротора для очистки семян риса от трудноотделимых сорняков: дис. еанд. техн. наук: 05.20.01. Харьков, 1971. 183 с.
19. Дринча В.М. Проблема движения воздуха сквозь колеблющееся сито на состояние постели из зерна и продуктов его измельчения: Труды ВНИИЗ. М.: 1962. Вып. 42. С. 279. 290.
20. Василенко П.М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностям сельскохозяйственных машин. Киев: УАСХН, 1960. 284 с.
21. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физикомеханических свойств. М.: Колос, 1978. 228 с.
22. Заика П.М. Динамика вибрационных зерноочистительных машин. М.: Машиностроение, 1977. 278 с.
23. Завгородний А.И. Теоретическое и экспериментальное исследование технологического процесса и средств очистки вибрационно-центробежных решет: Дис... канд.техн. наук: 05.20.01. Харьков, 1982. 225 с.
24. Тищенко Л.Н., Мазоренко Д.И., Пивень М.В., Харченко С.А., Бредихин В.В., Мандрыка А.В. Моделирование процессов зерновых сепараторов: монография. Харьков. 2010. 359 с.
25. Тищенко Л.Н. Исследование закономерности вибровязкости зерновых смесей при сепарировании цилиндрическими виброцентробежными: Вібрації в техніці та технологіях. Харків, 2013. С 64 – 71.
26. Пивень М.В. Обоснование параметров процесса решетного сепарирования зерновых смесей: афтореф. дис. ... канд.техн. наук: 05.05.11. Харків, 2006. 13 с.
27. Kharchenko S. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators: Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 2 (7). Харків. 2016. С. 80 – 94.

28. Stepanenko S. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH-Agricultural Engineering* 57 (1). 2019.

29. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Идентификация скорости движения частиц зерновой смеси через отверстия вибрационных зерновых сепараторов: *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2 (7), С. 63 – 69.

30. Прилуцкий А.Н. Методика исследования движения семян в вибропневмоцентрифуге. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. К.: Крожай, 1978. Вып 41, С. 40 – 45.

31. Малюта С.И. Обоснование технологического процесса и параметров семеочистительной пневмоцентрифуги: автореф. дис. ... кан. тех. наук. Глеваха, 1989. – 21 с.

32. Котов Б.І. Вібропневматичне розділення насінневих сумішей: *Вісник агротехнічної науки*. 2004. №5. С.25 – 27.

33. Богатирьов Д.В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною: дис. ... канд.тех. наук. Кіровоград, 2005. 152 с.

РОЗДІЛ 1

КОНСТРУКТИВНО-КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗАВАНТАЖЕННЯ НОРІЙНИХ КОВШІВ ЗЕРНОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ

У зв'язку з поширенням обсягів вантажно-розвантажувальних робіт при виконанні різних технологічних операцій с зерновими матеріалами збільшується попит на високоефективні норії різної продуктивності та висоти. В процесі їх удосконалення, що до стабільності роботи та надійності були досягнуті значні успіхи за рахунок використання нових матеріалів та результатів науково-дослідних робіт. Особливе значення надавалося дослідженню процесів розвантаження, тому що вважалося, що втрати продуктивності були пов'язані з утворенням, так званого, зворотного сипу як в робочу так і холосту труби.

Однак до теперішнього часу проблемним питанням є процес завантаження ковшів, від якого не в меншій мірі залежить продуктивність норії і сталість її роботи. Цій проблемі присвячено мало робіт, а отримані результати не відображають фізичну сутність процесу і не відповідають даним, отриманим в процесі експлуатації.

Незважаючи на гадану простоту, процес має складний динамічний характер, що залежить не тільки від конструктивно-кінематичних параметрів завантаження, але і від маловивчених, специфічних фізико-механічних характеристик зернових матеріалів таких як: пружність шару, опірність зрушенню всередині матеріалу, пористість при різній щільності упаковки, коефіцієнти тертя при русі по опорних поверхнях і при лавиноподібному витіканню по спусках. Визначення цих властивостей є актуальною проблемою механіки сипучих матеріалів.

Глава присвячена вирішенню питань, пов'язаних з визначенням фізико-механічних властивостей сипучого зернового матеріалу і з процесами заповнення ковшів при різних способах їх завантаження. Результати роботи можуть сприяти розвитку зернової галузі сільського господарства та збільшення експортного потенціалу України

Таким чином, визначення кінетико – конструктивних параметрів зачерпування норійних ковшів неможливо без наукового обґрунтування механіки сипких тіл, зокрема, процесів зсуву і витікання.

Досвід експлуатації норій в транспортуванні різних сипких матеріалів показує, що реальна продуктивність менше розрахункової. В окремих випадках ці втрати досягають до 20%. Встановлено, що зниження продуктивності визначається двома факторами: зворотнім сипом в башмак норії при розвантаженні ковшів в її голівці та неповним їх заповненням в процесі завантаження. Не дивлячись на гадану простоту обидва процеси мають складний фізичний характер. Вважалось, що головні втрати продуктивності відбуваються при розвантаженні ковшів, як в тихохідних , так і швидкохідних норіях. Тому основний упор було зроблено на дослідження саме цього процесу, на основі отриманих результатів були вдосконалені і стандартизовані конструкції ковшів, головок норій і встановлені раціональні кінематичні режими роботи. Однак до теперішнього часу домогтися 100% відповідності розрахункової і експлуатаційної продуктивності в багатьох випадках не вдається. Це пояснюється, не тільки нестабільністю фізико-механічних властивостей вантажів, але і, як вважають багато авторів, неповним завантаженням ковшів, процес якого малодосліджений. Наведені дослідні дані в довідковій літературі щодо залежності коефіцієнтів заповнення від швидкості стрічки, є досить приблизними і не враховують специфічних властивостей сипких вантажів і конструктивних особливостей живлячих норію пристроїв. Нечисленні дослідні роботи у цьому напрямі носять фрагментарний характер і являють собою лише академічну зацікавленість. Проте, вивчення цих робіт являється важливою необхідністю для побудови фізичних моделей, їх аналітичного рішення і відповідної експериментальної перевірки.

Визначення кінетико-конструктивних параметрів зачерпування в норіях неможливе без науково обґрунтованих даних про фізико-механічні властивості сипких тіл, зокрема, пружності і опору зсуву зернового шару.

1.1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ РОБОТ, ПРИСВЯЧЕНИХ МЕХАНІЦІ СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ЗАПОВНЕННЮ НОРІЙНИХ КОВШІВ

1.1.1. Дослідженню процесу зсуву в сипких тілах

Однією з перших являється теорія Кулона, згідно котрої ковзання (зсув) уздовж даної площини ковзання, виникає при критичному значенні дотичного напруження τ , пов'язаного з нормальною напругою залежністю

$$\tau = f(\sigma). \quad (1.1)$$

З цього випливає, що опір зрушення виникає тільки під дією ущільнюючого навантаження. Згідно Кулону:

$$f(\sigma) = \tau_0 + \mu \cdot \sigma, \quad (1.2)$$

де: τ_0 – міцність на зрушення, що залежить від зчеплення, а

$\mu \cdot \sigma$ – як міцність, обумовлена звичайним тертям з коефіцієнтом внутрішнього тертя μ .

Б.В. Дерягін вважає, що для сухих сипких тіл з повітряними проміжками між частинками, τ_0 може прийматися рівною нулю, за винятком високодисперсних сипучих тіл. Однак, це положення не відповідає дослідним даним. Так в роботі Г. Клейна [1] на підставі дослідних даних, отриманих при визначенні опору зсуву по методу Е. Дженіке [2] (буде розглянуто далі) стверджується, що зсувна сила підпорядковується наступному закону

$$T = N \cdot f + c \cdot F, \quad (1.3)$$

де: N – сила нормального тиску;

c – величина зчеплення, розмірність якої $\text{кг}/\text{см}^2$, тобто це розмірність дотичного напруження.

Таким чином, уточняється, що зчеплення частинок при зсуві притаманне всім сипким тілам, незалежно від їх дисперсності, змінюється лише його величина. Відзначимо, що і закон Кулона і залежність Г. Клейна, що є інтерпретацією закону Кулона, не визначають фізичну сутність тертя і зчеплення частинок.

Б. Дерягін вважає, що зчеплення викликається так званим прилипання в результаті молекулярної взаємодії між частинками. Однак, як буде показано далі, причина зчеплення частинок зовсім інакша.

Таким чином, виникає задача визначення величини зчеплення, фактично дотичних напружень, що перешкоджають зсуву. При вирішенні цього завдання використовуються дві фізичні моделі сипкого тіла.

До першої моделі відносять так звані зв'язні сипкі тіла, що представляють, відповідно до законів механіки суцільних середовищ, як ізотропний конгломерат малих, в порівнянні з елементарним об'ємом, дрібних частинок настільки пов'язаних одна з одною, що силовий вплив призводить до виникнення нормальних і дотичних напружень, пов'язаних певними співвідношеннями, а переміщення частинок можливе лише при перевищенні граничних значень цих напружень [3, 4, 5] та ін..

Таке сипке тіло має опір розтягування і зрушення в межах внутрішнього тертя і зчеплення. Перевагою такої моделі, являється можливість застосування диференціальних і інтегральних рівнянь теорії пружності для визначення значення дотичних напружень і крім того, напрямків майданчиків за якими вони діють. Це дозволяє визначити форму лінії обвалення, тобто лінії зсуву, і обсяги матеріалів при обваленні укосів, або насипів. Зазвичай, з деякими дослідними

поправками ця модель застосовується для розрахунку ґрунтів, що мають достатню пов'язаність частинок. Відомі спроби використовувати цю модель для зернистих сипких матеріалів, однак деякі дослідники (М. М. Протодьяконов і Д. Тейлор) [6], відмічають неправомірність такого підходу, тому що зернисті матеріали не мають здатності до розтягування, а опір зрушенню виникає в них тільки під дією ущільнюючого тиску. Така модель була використана навіть для визначення опору зачерпування з насипу норійними ковшами.

Друга модель сипкого тіла являє собою сукупність твердих, що не змінюють розміри частинок єдиної форми, зв'язок між якими здійснюється виключно силами тертя в контактних точках, так званими силами внутрішнього тертя, подолання яких і призводить до зсуву. Такі тіла є незв'язними, добре, або легко сипкими, здатні до витікання подібно рідинам. Незважаючи на цілий ряд робіт, присвячених вирішенню цієї моделі, в частині визначення дійсних значень і фізичної сутності коефіцієнта внутрішнього тертя, як коефіцієнта зсуву, до теперішнього часу не має однозначного наукового обґрунтування. Це пояснюється тим, що незв'язні дисперсні сипкі тіла визначаються більш широким спектром фізико-механічних показників, такими як структурна будова, що визначає так званий скелет сипкого тіла, і в зв'язку з цим фізичний характер пружності, характер деформації і опору зрушенню, здатність до витікання подібно рідинам, здатність переходити з пухкого стану в щільне і навпаки.

Інша, дискретна модель сипкого тіла отримала розвиток в роботах І.П. Прокоф'єва [2], Г.І. Дерсевича, [7] П.Н. Платонова [8], [9]. Найбільш близькими являється аналіз моделі, зроблений П. Платоновим. Автор вважає, що в основі опору зсуву лежить силова взаємодія між частинками, яка і визначає механізм передачі зусилля в сипкому середовищі. Розглядаючи сипкі середовища, як сукупність кінематичних пар, що складаються з двох, як і до нього вважалося, круглих частинок, які розташовані одна над одною на одній лінії (рис. 1.1., а).

При зсуві $S > S_0$ майданчик ковзання повертається на кут, і сила S повинна

врівноважуватися силою тертя спокою $F_{\text{шт}}$, яка повинна бути більше початкової сили тертя $F_{\text{шт}}$. В результаті починається обвалення по площині ковзання $n-n'$ з появою розпірної сили, яка і є причиною утворення склепіння. Цей силовий вплив не відповідає дійсному. Крім сили G_0 на частку діє нормальна сила ущільнюючого тиску P_0 . На рис. 1.1., б показано розташування часток одна над одною, що відповідає пухкій структурі, в якій, як відомо, опір зрушенню відсутній. Він з'являється в щільній структурі, коли частинки розташовуються в западинах, тобто знаходяться в зачепленні. У цьому випадку сила зсуву повинна подолати ортогональну складову сили ущільнюючого тиску і силу тертя, що виникає при виході частинок із зачеплення. Можна припустити, що утворення зводу при витіканні (виході) відбувається в результаті зустрічі двох потоків, лівого і правого, з випинанням частинок і збільшенням обсягу укладки.

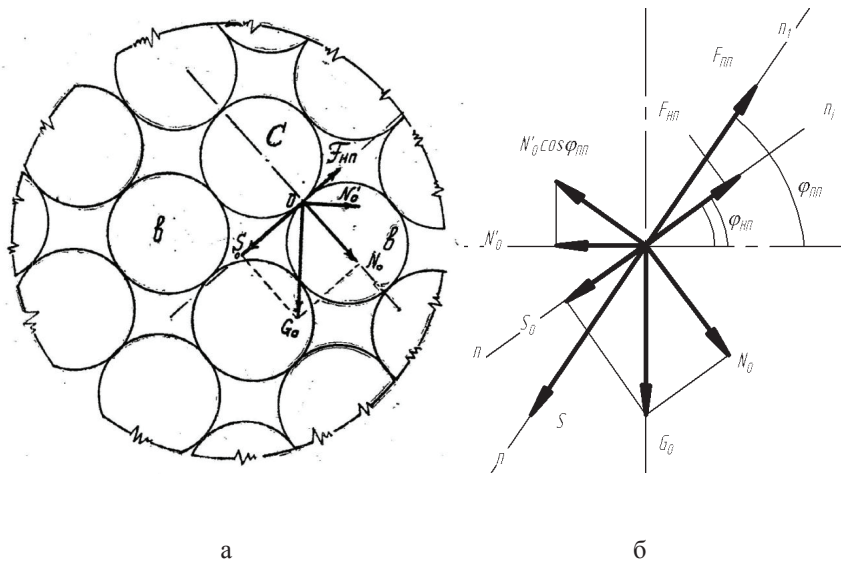


Рис. 1.1. Сили в контакті частинок сипкого середовища

В результаті взаємодії верхньої частки з двома нижніми виникне парна сила в протилежному напрямку, що і забезпечує рівноважний стан до прикладання зсувної сили.

У подальшій узагальнюючій роботі Н.П. Платонов [10], за результатами численних експериментів, встановив, що сила внутрішнього тертя більша за силу тертя, що визначається кутом тертя φ_{III} , котрий, зазвичай, приймається рівним куту відповідного скосу, а це залежить від щільності укладки частинок. В результаті для визначення опору зсуву автор пропонує емпіричну формулу для величини коефіцієнта внутрішнього тертя у вигляді:

$$f = tg\varphi_{III} = tg\varphi + \alpha \frac{K - K_{\min}}{K_{\max} - K}, \quad (1.4)$$

де: $\varphi = \pi/2 - \varphi_{III}$ – кут тертя на початку зсуву;

K_{\min} та K_{\max} – показники мінімальної та максимальної щільності укладки, при цьому мінімальний показник відповідає мінімальному коефіцієнту внутрішнього тертя, що визначається кутом природного укосу, максимальний показник відповідає максимальному коефіцієнту внутрішнього тертя, який не визначається кутом природного укосу;

K – показник кінцевої щільності усталеного руху потоку, який визначається висотою шару за емпіричною формулою;

α – коефіцієнт висоти зсувного шару.

Коефіцієнти, що характеризують щільність укладання сипкого тіла, визначається відомою залежністю

$$K = 1 - m, \quad (1.5)$$

де: m – пористість сипкого середовища.

Наведена автором залежність, як буде показано далі, не відповідає фізичній сутності опору зсуву, тому що в основі її структури не лежить кут природного відкосу. Позитивним можна вважати висновок, що згідно з формулою максимальне значення коефіцієнта внутрішнього тертя буде більше, ніж коефіцієнт внутрішнього тертя, який визначається за кутом природного укосу.

М.С. Бернштейн [11], користуючись методами статистичної механіки, отримав формулу для кута внутрішнього тертя сипкого тіла при деформаційній зміні форми укладки у вигляді:

$$\varphi = \arcsin \frac{R \cdot f \cdot \nu}{2 + \frac{R \cdot f \cdot \nu}{3}}, \quad (1.6)$$

де: R – число, що характеризує розподіл напружень і деформацій сипкого тіла;

f – коефіцієнт тертя ковзання зерна по зерну,

ν – відношення числа контактів ковзання до загальної кількості контактів, що припадають в середньому на одне зерно. Це відношення залежить від загального числа контактів n .

$$\nu = 1,5 - \frac{6}{n},$$

де: $4 < n < 12$.

Фактично параметр характеризує щільність укладки в залежності від її структури. З формули випливає, що кут внутрішнього тертя сипкого тіла зростає зі збільшенням щільності, яка визначається параметром ν . Як буде показано в розділі 1.2, опір зрушенню не визначається тертям ковзання зерен, а число R не повинно залежати від щільності укладки зерен. Формули Н. Платонова і М. Бернштейна представляють лише академічний інтерес, але вони показують, що необхідно подальше аналітичне дослідження впливу різних структур укладок, упаковки зерен в сипкому середовищі на опір зсуву.

Єдиним методом, що дозволяє визначити опір зсуву сипкого середовища, є експериментальний метод, запропонований в різних варіантах І.А. Цитовічем, В.І. Зенковим та Е. Дженіке. В основі цього метода покладено один і той самий метод зміщення одного шару сипкого матеріалу щодо іншого при різному ущільнюючому тиску з вимірюванням зусилля зсуву.

Найбільш перевіреним є метод Е. Дженіке, котрий стандартизовано (ASTM J 6128-97). На рис. 1.2 наведена схема приладу, що дозволяє визначити зусилля зсуву і відповідно коефіцієнт внутрішнього тертя в залежності від ущільнюючого тиску, створюваного вертикальним навантаженням V . Конструкція складається з верхньої рухомої рамки, заповненої сипким матеріалом, і нижньої – нерухомою з таким самим матеріалом. В цьому випадку нормальна напруга σ , від ущільнюючого навантаження, і відповідно τ складе:

$$\sigma = \frac{V}{A}, \quad \tau = \frac{F_t}{A}, \quad (1.7)$$

де: A – площа поперечного перерізу зсувного шару.

На рис. 1.3 приведені графіки залежностей $\tau = \sigma \cdot f_g \cdot \varphi$ і $F_t = \tau \cdot A$. Лінію функцій τ Е. Дженіке називають межею текучості сипкого шару (ПТ), а лінію функції F_t – функцією витікання (ФИ). Всі точки значень зусиль, що лежать вище лінії ФЗ приведуть до витікання, а в точках лежачих нижче – зсув і витікання відсутні. Кут нахилу φ лінії границі текучості ПТ Е. Дженіке називає ефективним кутом внутрішнього тертя, який, як він вважає, не має нічого спільного з кутом кута природнього укусу, який не є показником здатності витікання сипкого матеріалу. Кут природнього укусу лише визначить контур вільно насипаного матеріалу. Популярність цього метода серед інженерів і дослідників пояснюється, перш за все, простотою вимірювання.

Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя (коефіцієнт зсуву) за методикою Е. Дженіке підтверджують проведені вище теоретичні передумови

про те, що цей коефіцієнт більше коефіцієнта внутрішнього тертя, встановленого по куту природного відкосу. Е. Дженіке за результатами дослідів стверджує, що ефективний кут тертя є досить стабільним і при повторних дослідах відрізняється всього на кілька градусів і на відміну від рідини, не залежить від швидкості зсувної реформації.

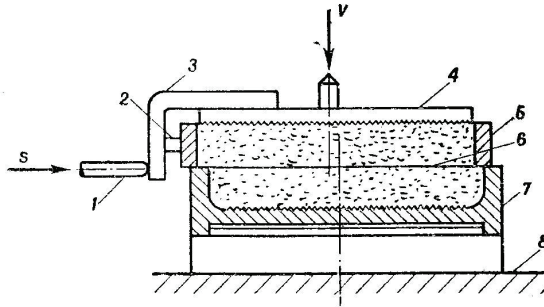


Рис. 1.2. Прилад для вимірювання опору зрушенню:

- 1 - стрижень, що передає зсувне зусилля, 2 - навантажувальний шток,
 3 - кронштейн, 4 - кришка, 5 - кільце, 6 - площина зсуву (площею А),
 7 - корпус, 8 - рама

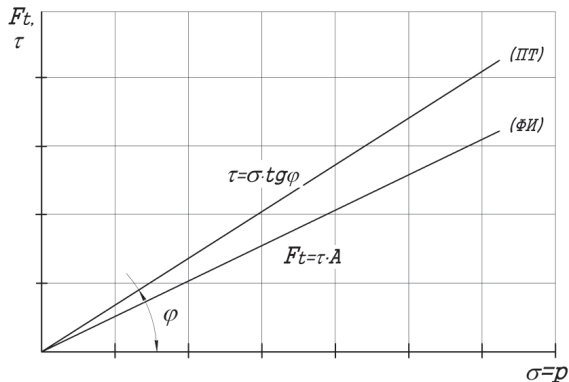


Рисунок 1.3. Лінії граничних дотичних напружень (ПТ і граничних сил зсуву ФИ).

Важливий внесок у дослідження фізичного процесу зсуву сипких матеріалів зробив Д. Тейлор [6]. Автор вважає, що застосовані формули теорії пружності для сипких тіл не придатні для визначення напружень і умов зсуву, що викликаються в сипких середовищах поверхневим навантаженням. Ці формули можна використовувати тільки в випадках пропорційності напружень і деформації в сипкому тілі. Крім цього, такий показник пружності, як коефіцієнт Пуассона, для сипких середовищ втрачає будь-який сенс, і при вирішенні окремих завдань повинен бути замінений коефіцієнтом залежності об'ємних деформацій від напружень. Модифікації цих формул із застосуванням коефіцієнтів концентрації напружень є умовними і часто емпіричними. При цьому не можна встановити можливу точність, що являється одним з серйозних недоліків застосування теорії пружності.

Автор, як і Е. Дженіке, вважає, що опір ковзання в сипких незв'язних матеріалах в будь-якій площині залежить від нормального тиску в даній площі і ефективного кута внутрішнього тертя, позначеного автором як Φ . При цьому вказується, що сутність тертя між частинками сипкого матеріалу дещо складніша, ніж між твердими тілами, оскільки воно уявляє собою частково опір ковзання і частково опір коченню (скочужання). Ефективний кут внутрішнього тертя більше кута природного укоса, який по суті, окремий випадок першого, внаслідок різних умов рівноваги частинок в насипу. Як і Дженік, Тейлор вважає, що силу зсуву можна визначити як:

$$P_s = P_n \cdot \operatorname{tg}\Phi, \quad (1.8)$$

де: P_n – сила, діюча в нормальному до площини напрямку.

Кут внутрішнього тертя Φ , згідно Тейлору залежить від зчеплення частинок, від щільності скелету шару, а також від нормального тиску. Надалі експериментально автор встановив, що при зсуві кут внутрішнього тертя Φ при

змінах щільності даного матеріалу майже не змінюється і в теоретичних дослідженнях опір зрушенню може прийматися постійною величиною.

Одним з найважливіших результатів досліджень Д. Тейлора є встановлення кількісного співвідношення складових ефективного внутрішнього коефіцієнта тертя. Досліджуючи процеси зсуву промитого сухого піску при тривісному стисненні за допомогою стабілометра, він встановив, що коефіцієнт внутрішнього тертя дорівнює 0,645. Частина цієї величини, що витрачається на тертя ковзання склала 0,475, а інша частина 0,170 – на тертя кочення при зачепленні частинок, що фактично відповідає опору збільшення обсягу.

Те, що опір зрушенню відбувається і за рахунок перекочуванню частинок в зачепленні, тобто за рахунок тертя кочення, було підтверджено Г.З. Фіалков [12]. Він встановив, що при випуску сипкого матеріалу з ємності з прозорими стінками обертаються навіть частки некруглої форми.

Слід відмітити, що сипкі матеріали дійсно мають дві складові тертя ковзання. Максимальний опір зрушенню має місце, коли частинки вже знаходяться в зачепленні внаслідок деформації структури (скелета), і зміщуватися і ковзати не можуть, а можуть тільки провертатися, прагнучі вийти із зачеплення. З цього можна зробити висновок про те, що перша частина опору є силовим фактором при контактній взаємодії частинок, що виникає в результаті нормального тиску, як і припускав П. Платонов.

Щоб провести аналіз однієї з останніх робіт, присвяченої дослідженню сипких матеріалів [13], розглянемо визначення граничного стану сипкого тіла при зсуві. Для цього використаємо графік напружень (діаграма Мора) в інтерпретації Д. Тейлора (рис. 1.4). Для незв'язних сипких середовищ міцність на зрушення (граничне дотичне напруження) буде дорівнювати:

$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \Phi. \quad (1.9)$$

Якщо прийняти, що кут внутрішнього тертя Φ являється постійною величиною, то міцність на зсув може бути представлена графічно двома прямими лініями, проведеними через початок координат діаграми Мора під кутом $\pm \Phi$. На графіку (див. рис.1.4), ці лінії зображені прямими OE і OE' ; зазвичай їх називають граничними лініями Мора.

Якщо напруження в даній точці зразка пісочного ґрунту представлено на діаграмі Мора кругом I, то можна помітити, що зсувне напруження в кожній площині, що проходять через цю точку, менше міцності на зсув. Наприклад, в площині нормального напруження OA зсувне напруження AB менше міцності на зсув AC . В таких умовах можливість зсуву відсутня. З іншого боку, було б неможливо піддавати даний зразок зсувним напруженням, відповідним кругу Мора III, так як ці напруження перевищують міцність на зсув.

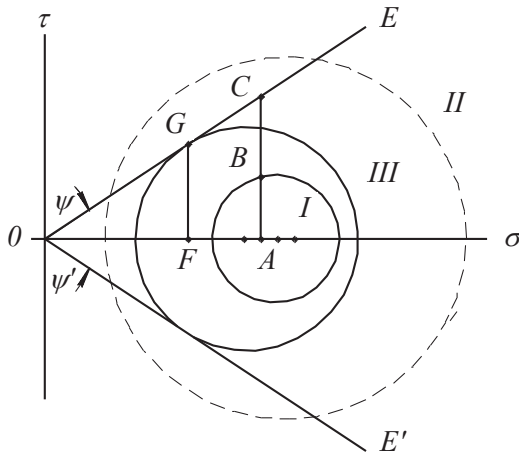


Рис. 1.4. Графічна схема теорії міцності Мора

Граничні лінії дотичні до кола III в точці G . У площині нормального напруження OF величина зсувного напруження дорівнює FG . Міцність на зсув

також дорівнює FG. Граничні лінії на графіку це граничні лінії плинності по Е. Дженіке.

З діаграми Мора випливає, що тільки нормальний тиск, і ніякі інші напруження, є єдиним чинником, що визначає міцність на зсув. В результаті теоретичного аналізу визначено критерій зсуву, який має логарифмічну залежність у вигляді:

$$n_s = \lg \frac{\sigma_n + T_n}{T_n} / \lg \frac{\tau_n}{\tau_{on}}, \quad (1.10)$$

де: τ_n – зрушуюче дотичне напруження;

σ_n – нормальне напруження у площині зсуву;

T_n – питомий опір на розрив від початкового питомого опору зсуву τ_{on}

Комплексним експериментом, проведеним автором на зразках органічного та неорганічного походження, підтверджено, що величина n_s не залежить від величин напруженого і попередньо-напруженого стану сипкого матеріалу, і є постійною величиною для даного матеріалу при заданих його вологості, гранулометричному складу і зовнішніх параметрах системи. Його значення знаходяться в межах $n_s = 1 \dots 6$. Чим його величина більше, тим матеріал має кращу здатність до витікання.

Вважається, що перехід від дограничного до граничного стану, коли відбувається зсув, визначається критерієм плинності. Теоретично отримана залежність коефіцієнта сипкості K_s – як функції величин основних фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу – вихідних параметрів системи і внутрішнього параметра – нормального напруження σ_n .

$$K_s = \frac{\sigma_n + \tau_{on} \cdot \left(\frac{\sigma_n}{T_n}\right)^{1/n_s} \cdot [f_n + (1 + f_n^2)^{1/n_s}]}{\sigma_n + \tau_{on} \cdot \left(\frac{\sigma_n}{T_n}\right)^{1/n_s} \cdot [f_n - (1 + f_n^2)^{1/n_s}]}, \quad (1.11)$$

де: f_n – коефіцієнт внутрішнього тертя на поверхні зсуву.

Сипкий матеріал, володіє більшою величиною K_s , є більш сипким, тобто більш схильний до витікання.

Аналізуючи наведені залежності можна зробити висновок про те, що їх неможливо модифікувати стосовно зернових матеріалів, так як при $T_n = 0$ ці залежності втрачають сенс. Що стосується зв'язних сипких матеріалів, то ці параметри неможливо імплементувати в залежності, що визначають реально характер витікання при різних технологічних операціях, в тому числі і при зачерпуванні. У реальних процесах опір зрушенню зв'язних сипких матеріалів визначається сумарним дотичним напруженням, що включає дотичне напруження внаслідок зв'язку. Ступінь сипкості матеріалу можна оцінити порівнянням значень такого комплексного показника, як кут внутрішнього зсуву, що визначає ступінь рухливості сипкого матеріалу. Тому видається, що ця робота має суто академічний інтерес.

Відзначимо, що метод Е. Дженіке дозволяє лише визначити ефективний коефіцієнт внутрішнього тертя при зсуві в сипкому середовищі, але не дозволяє визначити його складових, кожна з яких окремо грає велику роль при різних видах витікання.

Експериментальний метод Д. Тейлора досить складний, особливо в частині математичної обробки результатів визначення значень напружень і деформацій.

Надалі, нами буде показано, що більша частина опору зрушенню не визначається тертям ковзання в сипкому тілі, а має деформаційний характер.

1.1.2. Дослідження процесів завантаження норійних ковшів зерновими матеріалами

Дослідження завантаження норійних ковшів незв'язними сипкими матеріалами проводилися в двох напрямках: визначення ефективності заповнення ковшів і визначенню опору зачерпування.

Однією з перших робіт, присвячених завантаженню ковшів, є робота Г.І. Креймермана [14]. У ній викладені результати широкого виробничого дослідження процесів заповнення ковшів зерновим матеріалом при завантаженні норії проти ходу тягового органу, який складається з двох етапів: заповнення, при зачерпуванні з насипу і подальше досипання з завантажувального лотка. Основну увагу приділено до другого етапу, як фінішної операції, що, головним чином, забезпечує необхідний рівень заповнення.

Дослідження проводилося при великих швидкостях тягового органу в межах 2,3 – 6,2 м/с з нестандартними звареними ковшами, що мають різні кути зачерпування ($20^\circ - 40^\circ$) і різні обсяги (0,6...1,95л.). Кількість ковшів на 1м довжини стрічки варіювалося в межах 2,55 – 5,86. За результати випробувань автор стверджує, що всупереч існуючій думці, згідно з якою коефіцієнт заповнення ковшів залежить від швидкості стрічки і діаметра барабана, повне заповнення ковшів можливо при будь-яких значеннях цих параметрів, незалежно від обсягу зачерпування. При цьому необхідно забезпечити достатню висоту стовпа матеріалу для утворення ефективного струменя, що надходить в ковші. Автор пропонує емпіричну формулу для визначення висоти стовпа у вигляді:

$$S = \frac{q \cdot \varphi \cdot n}{30 \cdot K \cdot t} \quad (1.12)$$

де: q – геометричний об'єм ковша;

φ – коефіцієнт заповнення ковша;

n – коефіцієнт, враховуючий об'ємну вагу зерна ($K=1$ при $\gamma = 0,75$ т/м);
 K – ширина ковша;
 t – час проходження ковша відстані в один крок.

Крім того, висота приймаючого лотка повинна бути вище стовпа на 200...300 мм.

В роботі колективі авторів [15] наведено значення коефіцієнтів наповнення ковшів для різних способів завантаження норії. Відповідно до цих даних, коефіцієнт наповнення ковша різко зменшується із збільшення швидкості тягового елемента. Відзначається, що найбільш несприятливе наповнення ковшів спостерігається при зачерпуванні сипкого матеріалу з насипу. Найбільш вигідним вважається наповнення ковшів уздовж тягового елемента з досипанням зернових матеріалів для зачерпування із завантажувального лотка. Вказується, що завантажувальний лоток повинен бути встановлений над горизонтальною віссю направляючого барабана на величину, яка залежить від продуктивності. Відзначається, що при цьому опір зачерпуванню більший, ніж при черпанні по ходу.

Зовсім протилежну думку щодо опору завантаженні ковшів по ходу тягового елемента висловлює П. Боуманс у роботі [16]. Автор вважає, що в цьому випадку зусилля розтягування на стрічці вищі, що вимагає використання більш міцної стрічки та більшої потужності встановлення електродвигуна. Крім того, вказується, що з'являється небезпека деформацій ковша аж до їх відриву від стрічки. Що стосується завантаження ковшів проти хода, то автор вважає, що навантаження на стрічку і на кріплення ковшів менші, ніж при навантаженні по ходу.

До нашого часу при експлуатації зернових норій з навантаженням проти ходу тягового елемента зустрічаються випадки порушення завантаження ковшів із-за утворення затору в завантажувальних лотках.

З'ясуванню можливої причини цього явища була присвячена робота

Г.Н. Ламкіна [17]. Автор вважає, що причиною такого порушення подачі зерна при досипанні являється утворення ущільнювального осередку (ядра) на виході з навантажувального лотка внаслідок удару черпальної крайки ковша та відбивної частини стінки ковша по зерновому потоку у напрямку, протилежному руху зерна. Для усунення або мінімізації цього явища пропонується встановити додатковий вертикальний лоток шириною $l_{л}$. На думку автора, це дозволить відкинути частину потоку при ударі в додаткову порожнину, що поліпшить витікання шару потоку в ковші. Запропоновано визначати приблизну ширину додаткового лотка за формулою:

$$l_{л} = \frac{h_{\mathcal{E}}' \cdot \sin \beta}{\cos(\alpha + \beta)}, \quad (1.13)$$

де: $h_{\mathcal{E}}'$ - висота відкриття заслінки впускного отвору (фактично висота потоку);

α - кут нахилу дна лотка;

β - кут викидання щодо лінії руху крайки ковша.

Автор склав систему емпіричних рівнянь, пошарового заповнення ковша з урахуванням опору надходженню матеріалу в ківш, рішення якого дозволяє визначити \mathcal{G}_{ejx} - швидкість витікання любого шару зерна e , при любому положенні ковша j щодо потоку. Тоді середня швидкість потоку зерна, що надходить до ковша, визначається як:

$$\mathcal{G}_n = \frac{\sum \mathcal{G}_{ejx}}{a + h_{\mathcal{E}}} \Delta h_{\mathcal{E}}, \quad (1.14)$$

де: $h_{\mathcal{E}}$ - товщина потоку;

Δh_3 – товщина шару потоку;

a – параметр місця знаходження крайки ковша відносно виходу потоку.

Що стосується утворення ущільненого ядра в завантажувальному лотку, то це не є причиною удару елементів ковша по потоку. Про це свідчить той факт, що це явище зникає, якщо завантажувальний лоток встановлено вище горизонтальної осі напрямного барабана, хоча контакт ковша з потоком зерна відбувається і в цьому випадку. Оскільки фізична причина цього явища не встановлена до нашого часу, навіть при вказаному способі встановленні завантажувального лотка в окремих випадках трапляються пробки та порушення заповнення ковшів. В роботі [18] рекомендується встановлювати датчики тиску на завантажувальні лотки, які перекривають подачу матеріалу в норію під час заторів. Однак це збільшує собівартість і фактично не сприяє стабільній роботі норії.

Різні думки, щодо опору зачерпуванню різними способами навантаження норії, наведені у розглянутих вище роботах, свідчать про необхідність серйозного вивчення особливостей процесів зачерпування та фізичної сутності, що трапляються при цьому явищі. Однією з перших робіт, присвячених цій проблемі, була робота Г. Гофштенгеля. На основі експериментів з промисловими сипкими матеріалами, вони встановили ряд емпіричних залежностей, щоб визначити питому роботу зачерпування для різних вантажів і швидкостей. Отримані автором дані до сьогоднішнього дня, з невеличкими уточненнями дають мало роз'яснень в різних літературних джерелах.

А.О. Співаковський [19] у своїй роботі пропонує оцінити опір до зачерпування у формі:

$$F_{зач} = K_{зач} \cdot q, \quad (1.15)$$

де: $K_{зач}$ – коефіцієнт зачерпування, відображає конкретну роботу, необхідну для зачерпування 1 кг вантажу;

$$q = \frac{P}{3,6 \cdot g} \text{ – поточне навантаження на стрічці;}$$

P – продуктивність норії (т/год).

Відповідно до даних Г. Гофштенгеля на швидкостях стрічки в межах 1–1,25 м/с для порошкових та дрібно кускових вантажів $K_{зач} = 1,25 – 2,5$.

В роботі [15] вказується, що для сільськогосподарських вантажів значення $K_{зач} = 2 – 5$ залежить в основному від фізико-механічних властивостей. В довіднику А.В. Кузьміна – Ф.Л. Марона [20] наведено дані, що для порошкових і зернистих матеріалів при швидкостях 0,5 – 1,6 м/с коефіцієнт зачерпування знаходиться в межах 1,5 – 3. Аналіз цих даних показує нелінійне збільшення коефіцієнту зачерпування від швидкості стрічки, навіть при її низьких значеннях. Німецькими інженерами В. Боймером і Н. Вемайером в роботі [21], була зроблена змога розділити роботу зачерпування на окремі складові, залежні від різних факторів (коефіцієнта внутрішнього тертя, швидкості черпання та ін.). Однак вплив кожного фактора окремо не встановлено. Експериментально знайдені лише підсумкові значення конкретної роботи із зачерпування.

Останніми роботами, присвяченими теоретичному і експериментальному дослідженню опору черпання сипких матеріалів норій ними ковшами є роботи В.Я. Готліба [22]. Розглядалась модель, згідно якої рухаючись відносно центра обертання, ківш врізається в насип з поступовим наповненням. Після повного заповнення, перед ковшем утворюється так звана призма випирання з не зачерпнутого матеріалу. При подальшому переміщенні ковша призма переміщується догори по деякій криволінійній поверхні ковзання. В процесі аналізу вважалося, що основою опору є пасивний тиск маси вантажу на ківш. Сили зчеплення призми з насипом не враховувались, оскільки вважалося

незначно малими. Контур ковзної лінії і відповідно, форму призми визначали двома способами. При першому способі було використано графоаналітичний метод теорії пружності С.С. Голушкевича [23]. Метод заснований на використанні системи характеристичних кіл, за допомогою яких можна вирішити ряд задач граничного стану рівноваги сипкого середовища. Зокрема, цей метод дає можливість визначити напрямок ділянок ковзання залежно від напруженого стану в зоні положення ковша та кута внутрішнього тертя.

Метод С.С. Голушкевича призводить до результату, що зсув матеріала перед рухаючим ковшем буде виникати уздовж лінії ковзання, що складається з двох прямих, верхньої та нижньої (в зоні мінімального та максимального напруженого стану), з'єднаних сегментами логарифмічної спіралі (у проміжній зоні граничних напружень).

На рис. 1.5 наведені графіки зміни опору в залежності від кута повороту ковша.

Крива 1 відображає зміну моменту за теоретичними залежностями, а площа під нею відповідає теоретичній кількості роботи, що витрачається на поворот ковша. Крива 2 відповідає експериментальним даним. Крива 3 відображає зміни моменту у зв'язку з підвищенням рівня відкосу в результаті випирання. Всі побудови виконані для глибокого ковша з висотою 110 м для піску з об'ємною вагою $1,6 \text{ т/м}^3$ та кутом природного відкосу $\rho = 30^\circ$. Відстань від центра обертання до зовнішнього краю ковша 312 мм.

Порівняння отриманих результатів показує, що відхилення теоретичних значень від експериментальних становить 15...30%. А якщо виключити довільно обраний коефіцієнт K_2 (додаткові маси в розрахунковій схемі відсутні), то похибка досягає 50%. Це свідчить про те, що не враховано опір зміщення призми випирання, котрий, як відомо, залежить від тиску ущільнення і є одним з основних опорів при зачерпуванні.

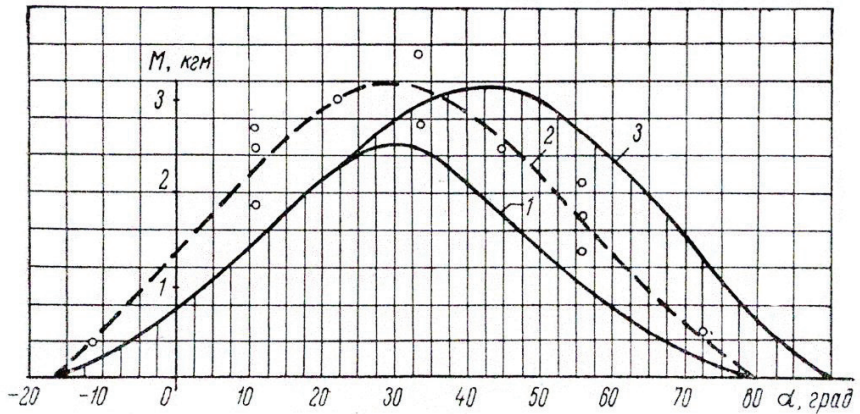


Рис. 1.5. Зміни обертаючого моменту в залежності від кута повороту:

1 – теоретична зміна моменту по методу С.С. Голушкевича; 2 – зміна моменту з урахуванням тертя ковша об матеріал; 3 – зміна моменту з урахуванням збільшення розрахункової поверхні відкосу.

Другий спосіб, застосований Готбілом, спирається на те, що форма призми випирання визначається кругло циліндричною поверхнею ковзання. Д.В. Тейлор в своїй роботі відмічає, що ця форма поверхні ковзання була встановлена в результаті вивчення обрушення и зсуву відкосів ґрунтів різними вченими та інженерами. При цьому було розроблено кілька методів, таких як аналітичні та графічні методи вертикальних елементів, метод розрахунку по колу тертя та ін. В основі метода вертикальних елементів, розробленого В. Релленіусом, у викладанні Д. Тейлора, лежить розрахунок стійкості окремих вертикальних елементів маси ґрунту, обмежених зверху поверхнею ґрунту, а знизу поверхнею ковзання.

Висновки до розділу 1.1

Узагальнюючи результати аналізу відомих досліджень, можна стверджувати, що напрямок дисертаційної роботи, який передбачає обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів навантаження з метою забезпечення ефективної роботи норії, має певний науково-практичний сенс.

За результатами аналізу, котрий приведено в розділах 1.1 можна зробити наступні висновки.

1. Відомі значення коефіцієнтів внутрішнього тертя, визначаються кутом природного нахилу не відображають такі специфічні фізико-механічні властивості зернових матеріалів, як пружність, опір зсуву, здатність до зміни щільності структури і, відповідно, параметрів витікання при завантаженні ковшів.

2. Отримані аналітичні залежності для визначення рівня заповнення ковшів не відображають реальний фізичний процес зачерпування, а наведені середньо-наближені значення коефіцієнтів заповнення в різних довідкових джерелах не супроводжуються інструкціями щодо того, якими параметрами завантаження їх можна буде забезпечені

3. Не виявлені причини можливого утворення заторів у завантажувальних лотках і якими раціональними конструктивними засобами можливо цьому запобігти.

4. Визначення опору зачерпування з застосуванням методів теорії пружності для суцільних ізотропних тіл і без врахування опору зсуву масиву, що зачерпується одним ковшем, не дозволяє отримати достовірні дані про проведену роботу. При цьому не враховується, що навіть і в тихохідних норіях зачерпування здійснюється одночасно групою ковшів, а в швидкісних норіях на це ще й впливає динаміка процесу.

1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОПОРУ ЗСУВУ ЗЕРНОВОГО ШАРУ

У першому розділі було встановлено, що опір зсуву незв'язних сипких матеріалів, до яких відносяться і зернові, складається з двох частин. Перша частина, більша за величиною, визначалася як опір сил тертя; друга частина, менша – як опір виходу часток з зачеплення без пояснення фізичного ефекту. Для першої складової, положення, що відомі о природі тертя [24, 25], не дозволяють пояснити цей опір дією сил тертя. Ковзання часток без зачеплення буде відбуватися по малим площинкам дотику і суттєвого опору зсуву, від сил тертя, навряд чи буде. Крім того, як відомо, зі зростанням тиску коефіцієнт тертя зменшується, того часу як опір зсуву зростатиме. Аналіз процесів обвалення відкосів зв'язних матеріалів (грунтів) показав, що опір зсуву, що визначає їх стійкість, залежить від їх пружних, пружно-пластичних властивостей та сил тертя. При цьому пружно-деформований стан шару, що знаходиться під дією ущільнюючого тиску, повинен залежати від характеру упаковки зернин у шарі.

1.2.1. Напружено-деформований стан зернового шару та його параметри при зсуві

Для визначення пружного опору зернового шару при зсуві розглянемо його структурні зміни в процесі зсуву частинок, які перебувають під дією ущільнюючого тиску. Відомі різні види укладання частинок, що представляють собою тіла обертання. До таких частинок можна віднести такі зернові, як горох, просо та інші, які мають практично сферичну форму, та еліпсоїдні: пшениця, жито, соя та інші.

Розглянемо ідеалізований зерновий шар, що складається з сферичних частинок однакового діаметра (куль) або еліпсоїдних з співвідношенням півосей $b/a = 1/2$. З точки зору аналізу представляють інтерес кубічна (рис.1.6., а), та ромбоєдрична (рис.1.6., б) укладка. Перший має більшу пористість (порозність)

та вважається пухкою, другий – з меншою пористістю вважається щільною. Щільним вважається і тетраедричне укладання, у якому геометрія укладання збігається з ромбоедричною в поперечному перерізі.

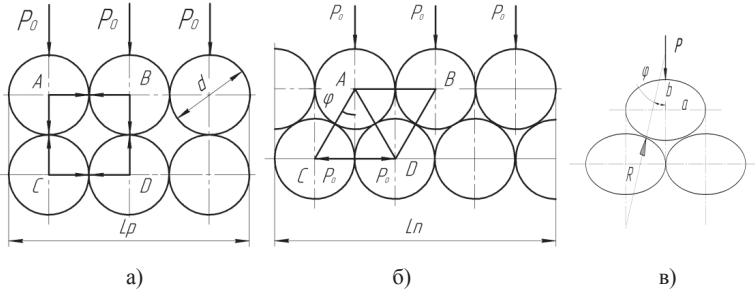


Рис. 1.6. Розподіл сил тиску при зсуві

Пористість цих упаковок однакова. При прикладанні до шару зсувного зусилля, останнє починає зростати внаслідок переходу від пухкої структури до щільної і досягає постійної граничної величини, перевищення якої призводить до руху (витіканню) шару. Перехід від пухкої структури до щільної супроводжується і зменшенням об'єму. Виділимо елементарний об'єм упаковки, що складається з 8 частинок і елементарний обсяг, що деформується, у вигляді квадрата, сторони якого утворюються центрами частинок.

Розглянемо силову взаємодію між частинками в граничному стані, приймаючи їх абсолютно жорсткими (рис. 1.6., б). На верхні елементи поверхні будуть діяти сили тиску P_0 , а на контактуючу з ними нижні частинки – їх ортогональна складова $P'_0 = P_0 \text{tg} \varphi$, де φ – кут тиску. На кожен нижню частинку будуть діяти дві складові P'_0 , рівні за величиною і протилежні за напрямком. В результаті, при відсутності зсувного зусилля система буде перебувати в рівновазі. Тангенс кута φ являється кутовою деформацією шару Y .

Аналогічно будуть діяти і парні дотичні напруження $\tau = p \cdot \text{tg} \varphi = p \cdot Y$, де: p – тиск на одну частинку.

У зернин сільськогосподарських культур еліпсоїдної форми розміри напівосей мають співвідношення $b \approx \frac{1}{2}a$ незалежно від об'єму, а кутова деформація буде такою же, як і у сферичних зерен, тобто рівна (рис. 1.6., а і 1.6., в):

$$Y = \frac{r}{d} = \frac{b}{a} = 0,5.$$

Як було показано вище, при ущільнюючій тиску зміна обсягу супроводжується відповідно зміною форми укладання. Застосовуючи методи теорії пружності для зернового шару, як дискретного середовища, тензор деформації зсуву можна уявити, як суму двох складових:

$$T_\varepsilon = T_\varepsilon^0 + D_\varepsilon, \quad (1.16)$$

де: T_ε^0 – шаровий тензор деформації, котрий відповідає деформації об'єму без змін форми;

D_ε – девіатор тензору деформації, відповідний до зміни форми без зміни об'єму.

Ущільнюючий тиск p в зерновому шарі рівномірно передається в напрямку координат x , y і рішення знаходиться в плоскій постанові задачі.

Рівняння (1.16) в матричній формі має вигляд:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}Y_{yx} & 0 \\ \frac{1}{2}Y_{xy} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon^* & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon^* & \frac{1}{2}Y_{yx} & 0 \\ \frac{1}{2}Y_{xy} & \varepsilon_y - \varepsilon^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.16)$$

де: $\varepsilon^* = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}$ – середня деформація об'єму.

Використовуючи для спрощення запису дельта – символ Кронекера δ_{ij} , рівняння (1.16) приймає вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^* \cdot \delta_{ij} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ij}. \quad (1.17)$$

Оскільки зміни об'єму та форми відбуваються одночасно, то ε^* та Y є взаємозалежними. З урахуванням раніш встановленого співвідношення $\tau = p \cdot Y$ та геометричної залежності Коші для шару в вигляді $\frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y}$, співвідношенням між ε^* і Y можна представити у вигляді:

$$\varepsilon^* = 2 \cdot \lambda \cdot Y^2, \quad (1.18)$$

де: λ – коефіцієнт, враховуючий опір зсуву, від кутовій деформації і вклинювання частинок в реальній укладці, і відповідне зменшення пористості.

Для плоского стану тензор напружень представимо, як суму кульового тензора і девіатора:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\sigma_x + p & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & -\sigma_y + p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \quad (1.19)$$

де: P – тиск на шар;

τ – дотичні напруження, або

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}. \quad (1.20)$$

Для знаходження дотичних напружень, визначаючих рівноважний стан, використаємо варіаційне рівняння Лагранжа. В основу його покладено принцип, що сума віртуальних робіт зовнішніх і внутрішніх сил дорівнює нулю. У нашому випадку ця умова має вигляд:

$$w_{ij} = -p \cdot \delta\varepsilon + \tau_{ij} \cdot \delta Y_{ij} = \left(\tau_{ij} - p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} \right) \cdot \delta Y_{ij} = 0, \quad (1.21)$$

де: w_{ij} – сума віртуальних робіт від p і τ ;

$$\delta\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} \cdot \delta Y_{ij} \text{ – символ варіації, що означає, що компоненти уявної}$$

деформації передбачається нескінченно малими.

У рівнянні (1.21) перший співмножник дорівнює нулю:

$$\tau_{ij} - p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} = 0, \quad (1.22)$$

звідки слід

$$\tau_{ij} = p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}}. \quad (1.23)$$

Враховуючі (1.23), отримаємо значення дотичного напруження:

$$\tau_{ij} = 2 \cdot p \cdot \lambda \cdot Y_{ij}. \quad (1.24)$$

Оскільки у дискретному шару $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon^*$ и $\sigma_x = \sigma_y = p$, то у рівняннях (1.16) і (1.19) девіатори відповідають тензорам чистого зсуву $\tau_{ij} = |\varepsilon|$ і $Y_{ij} = |Y|$.

Відповідно:

$$\tau_{ij} = \begin{Bmatrix} 0 & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} \text{ і } Y_{ij} = \begin{Bmatrix} 0 & \frac{1}{2}Y_{yx} & 0 \\ \frac{1}{2}Y_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}$$

Рівняння (1.24) для шару приймає вигляд:

$$\tau = 2 \cdot p \cdot \lambda \cdot Y. \quad (1.25)$$

З рівняння (1.25) випливає, що для ідеальних частинок при $Y=0.5$

$$\tau = p \cdot \lambda. \quad (1.26)$$

Таким чином, пружним опором зсуву дискретного шару є необхідність подолання сил ущільнюючого тиску при зміщенні та сил опору виходу частинок із зачеплення в утворюваній щільній структурі. Цей опір не залежить від пружності самих частинок, які можна вважати абсолютно жорсткими. У першому наближенні коефіцієнт зсуву λ визначено за допомогою емпіричної формули, з урахуванням того, що деформація ідеального шару при переході від пухкої до щільної укладки супроводжується зміною пористості.

В цьому випадку приблизно:

$$\lambda = Y \cdot \frac{1-n}{1-m}, \quad (1.27)$$

де: $n = 0,258$ – пористість тетраедричної щільної укладки;

$m = 0,476$ – пористість рихлої кубічної укладки [20].

З урахуванням того, що для ідеальних заокруглених частинок $\gamma = 0,5$, отримано значення $\lambda = 0,708$.

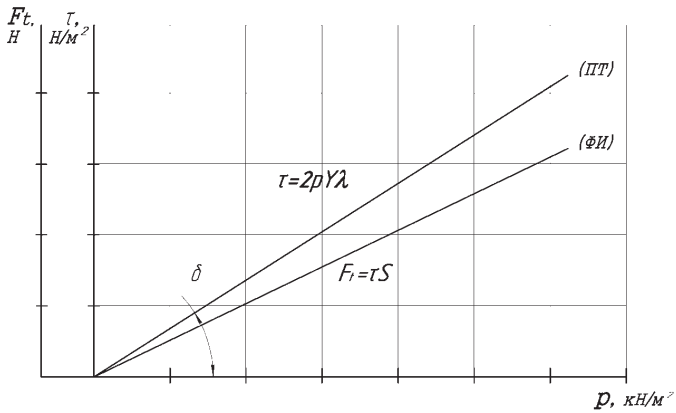


Рис. 1.7. Лінії граничних дотичних напружень (ПТ) та граничні сили зсуву (ФИ).

На рис. 1.7 представлені лінії граничні дотичні напружень $\tau = p \cdot \lambda$ та лінії граничних сил зсуву $F_t = \tau \cdot S$, де S – площа основи шару, δ – ефективний кут зсуву, p – ущільнюючий тиск, f_3 – ефективний коефіцієнт внутрішнього тертя.

Лінію $\tau = p \cdot f_3$ – називають межею плинності (ПТ), а лінію $F_t = \tau \cdot S$ – функцією витікання (ФИ). Всі точки значень зусиль, прикладених до шару, що лежать вище лінії ФИ приведуть до витікання шару, для шарів, що лежать нижче – витікання відсутне. Таким чином те, що Е. Дженіке називає ефективним кутом внутрішнього тертя, являється ефективним кутом зсуву, а коефіцієнт f_3 – ефективним коефіцієнтом зсуву, чи просто – коефіцієнтом зсуву, тобто λ .

Для зернівок, що мають округлену форму, або так звану обкатану форму, опір виходу зерен з зачеплення при зсуві буде виникати внаслідок їх опору перекочуванню.

На рис. 1.8 показана схема входу – виходу округлених частинок з зачеплення при зсуві. Опір зсуву утворюється в наслідок виникнення дотичних

напружень τ' , що виникають при контакті частинок в русі. В цьому випадку сумарне дотичне напруження буде дорівнювати $\tau = \tau' + \tau''$, де $\tau' = p \cdot \operatorname{tg} \varphi = p \cdot Y$, $\tau'' = \tau_{\text{тп}} / \cos \varphi$, $\tau_{\text{тп}}$ - дотичні напруження тертя кочення. В результаті отримуємо $\tau = p \cdot Y + p \frac{\mu}{\cos \varphi} \cos \varphi$, де p - тиск на частинку, Y - кутова деформація, μ - коефіцієнт тертя перекочування або коефіцієнт опору виходу із зачеплення.

Остаточно $\tau = p \cdot (Y + \mu)$, де $(Y + \mu) = \lambda$ або

$$\mu = \lambda - Y. \quad (1.28)$$

Для пшениці $\mu = 0,686 - 0,5 = 0,186$ з урахуванням деформації зсуву ідеальних частинок.

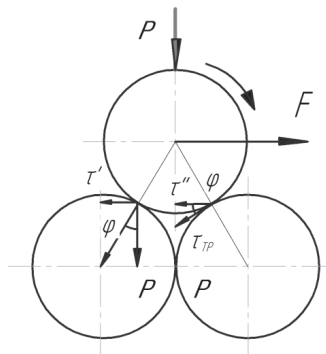


Рис. 1.8. Схема відтворення дотичних напружень при зсуві нового шару.

Таким чином, частина коефіцієнта опору зрушенню для пшениці від сил тертя становить $\mu = 0,186$, а це більше ніж опір від сил тертя у сухого піску. Це пояснюється виникненням капілярних сил зчеплення зерен внаслідок їх вологості [26].

При виході із зачеплення відбувається перекочування не тільки заокруглених частинок, але і не округлених частинок, що підтверджується в

роботі [12], присвяченій дослідженню випуску сипкого середовища з ємностей з похилими стінками.

Коефіцієнт тертя перекочування грає важливу роль при розрахунках швидкості руху і висоти зернового потоку по похилих площинах з різних матеріалів. У цьому випадку він поряд з коефіцієнтом тертя ковзання є складовою сумарного коефіцієнта тертя. Встановлено, що при кутах нахилу опорної площини, тангенс яких перевищує значення 0,3, рух потоку сипкого матеріалу носить лавиноподібний характер. При цьому відбувається збільшення висоти потоку, а для сипкого матеріалу з не округленими частинками, що має високе значення коефіцієнта тертя ковзання, спостерігається зрив верхнього шару і його рух зі швидкістю, що перевищує швидкість самого потоку. Це явище має місце внаслідок того, що опір зрушенню, яке визначається коефіцієнтом тертя перекочування, значно менше опору переміщенню нижнього шару, який визначається сумарним коефіцієнтом тертя, який в пухкій структурі лавини можна визначити як:

$$f^* = f_c + K \cdot \mu, \quad (1.29)$$

де: f_c – коефіцієнт тертя ковзання шару по площині;

$K = 0,7 - 0,8$ загальноприйнятий коефіцієнт тертя кочення при русі (0,7 – при високій швидкості руху).

З урахуванням ефективного коефіцієнта зсуву кут нахилу, відповідний початку утворення лавини складе $\alpha = \arctg \lambda$.

Висоту потоку при лавиноподібне русі можна визначити як:

$$h^* = h \cdot \frac{m}{n} \cdot (1 + f_c) \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (1.30)$$

де: h – фактична висота для не лавиноподібного потоку;

θ – кут нахилу опорної площині.

Для не заокруглених частинок, наприклад частинок сухого піску, збільшення висоти може бути досить значним, і за даними роботи [27] може перевищувати висоту не лавиноподібного потоку в 2-3 рази в залежності від кута нахилу. Для заокруглених частинок збільшення висоти потоку буде меншим.

1.2.2. Визначення опору зернових матеріалів зсуву на вісесиметричному відкості

Параметри зсуву реального шару з зернами різної форми і розмірами відрізняються від їх значень для «ідеального» шару. До теперішнього часу реальні параметри можна було визначити або експериментально за допомогою методу Е. Дженіке, який дозволяє отримати значення коефіцієнта зсуву λ , або використовуючи метод Д. Тейлора, визначаючи всі параметри. При цьому необхідно точно визначити насипну щільність, від якої залежить розрахунковий ущільнюючий тиск. Крім того, необхідно з високою точністю вимірювати зсувне зусилля. Це вимагає або застосування тензOMETричних, спеціально виготовлених датчиків, у вигляді певного розміру пластин, з наклеєними тензорезисторами, і відповідної вимірювальної апаратурою, або електронних динамометрів високої точності з тарировкою шкали еталонними вантажами. Ще більш складним є метод Д. Тейлора визначення параметрів зсуву шляхом тривісного стиску матеріалу за допомогою стабілометра.

При розрахунку і розробці універсальних або спеціальних зернових норій необхідний більш простий метод отримання параметрів зсуву без визначення насипної щільності та вимірювання зсувного зусилля. Практично це можна здійснити шляхом аналізу процесу обвалення зернового масиву з природним зсувом шару і утворенням кута природного укусу.

Розглянемо фізичний процес витікання, обвалення матеріалу з

циліндричної ємності, при якому утворюється вісесиметричний відкіс (рис. 1.9., а). Відтворення укосу буде відбуватися під дією двох дотичних напружень (рис. 1.9., б). Розширення укосу будуть перешкоджати дотичні напруження тертя, що діють в горизонтальній площині і дорівнюють $\tau_f = p \cdot f$, де f – коефіцієнт внутрішнього тертя, що визначається кутом природного укосу ρ . Лавиноподібному обпаданню вниз шару будуть перешкоджати дотичні напруження зсуву, рівні відповідно до формули (1.24) $\tau_\lambda = 2p \cdot Y \cdot \lambda$.

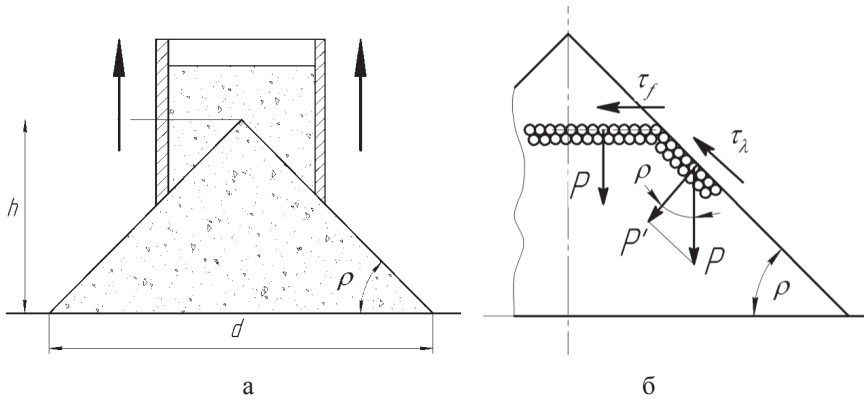


Рис. 1.9. Схема утворення вісесиметричного укосу:

а – параметри; б – діючі напруження.

Рівновага, утвореного укосу, буде визначатися умовою:

$$\tau_f = \tau_\lambda \quad (1.31)$$

Нормальний ущільнюючий тиск $p' = p \cdot \cos \rho$. Умова рівноваги при цьому набуває вигляду:

$$p \cdot f = 2p \cdot Y \cdot \lambda \cdot \cos \rho. \quad (1.32)$$

Звідкіля

$$\lambda = \frac{f}{2Y \cdot \cos \rho} \quad (1.33)$$

Кут укосу легко визначається виміром тонким щупом висоти h та за допомогою штангенциркуля – діаметру d .

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{2h}{d}.$$

Згідно формулі (1.28) коефіцієнт μ визначається як $\mu = \lambda - Y$.

Таким чином, необхідно вирішити питання визначення кутової деформації зсуву при реальних розмірах частинок шару. Порівняємо дані, отримані по залежності (1.28) і (1.33) з експериментальними даними Д. Тейлора. Експериментальні дані Д. Тейлора при тривісному стиску сухого промитого піску складають $Y = 0,475$, $\lambda = 0,645$, $\mu = 0,170$. За довідковими даними для середнього за розмірами промитого піску $\rho = 28^{\circ}29'$. Прийємо $\rho = 28^{\circ}30'$, при якому $f = 0,543$. При $Y = 0,475$ за залежностями (1.33) і (1.28) отримаємо $\lambda = 0,651$ та $\mu = 0,176$. Таким чином, залежності (1.33) і (1.28) являються робочими та можуть бути використані при практичних розрахунках.

Аналіз зсуву ідеалізованого шару показав, що величина абсолютного зсуву і величина кутової деформації відповідно залежить від розмірів частинок і їх співвідношення. У шару з ідеальними частками, мають несферичну форму, кутова деформація визначається відношенням двох розмірів. Взаємне розташування реальних частинок в процесі зсуву, що визначає величину кутової деформації буде визначатися трьома розмірами: довжиною (висотою), шириною і товщиною. У цьому випадку середню величину кутової деформації для заокруглених частинок близьких до ідеальної кулі можна визначити як:

$$Y = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{2a_{cp}}. \quad (1.34)$$

де: a , b і c – відповідно довжина, ширина і товщина частки (зерна).

Середня величина розміру визначається як пів сума його мінімальної і максимальної величини. Для інших частинок (заокруглених і не заокруглених) величину кутової деформації необхідно приймати шляхом приведення їх до умовної округленої частинки (табл. 1.1). У табл. 1.2 наведені мінімальні та максимальні розміри зерен сільськогосподарських культур за даними каталогу «Wintersteiger», Торгівельного двору «Агропромисловий портал» та інших джерел (див. сайт TehTab.ru).

При лавиноподібному витіканні зернового потоку, відбувається збільшення його висоти за рахунок переходу від щільної до пухкої структури зі зміною пористості.

Для реального шару з неоднаковими розмірами зерен значення пористості для пухкої і щільної структури невідомі. Параметри пористості можна визначити лише експериментально з застосуванням відомих залежностей:

$$m = 1 - \frac{q_p}{q}, \quad n = 1 - \frac{q_{II}}{q_{II}},$$

де: q_p – насипна щільність пухкої структури;

q_{II} – щільної структури;

q_{II} – дійсна густина зернового матеріалу без порожнеч між зернами в укладці.

Основну складність представляє визначення істинної щільності (раніше питомої ваги) зернового матеріалу, так як при цьому необхідно точно визначити обсяг однієї зернівки. Існує кілька наближених методів такого визначення – зануренням в рідину потопаючих зернівок, обчисленням витісненого об'єму, обчисленням умовного діаметра кулі за розмірами a , b , c зерна [28], [29], обчисленням обсягу зерна за формулами стереометрії з визначенням

відповідності форми зерна відомим просторовим фігурам. Застосування того чи іншого методу розглянемо в процесі експериментального дослідження фізичних властивостей зернового матеріалу.

Таблиця 1.1

Значення відносної кутової деформації зсуву Y для різних зернових культур

Характеристика форми зерна	Формула залежності для визначення Y	Культура	Y
Заокругленні, у яких $a_{cp} \approx b_{cp} + c_{cp}$	$Y = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{2a_{cp}}$	пшениця	0.52
		просо	0.492
Заокругленні, у яких $a_{cp} \approx b_{cp} \approx c_{cp}$	$Y = \frac{r_{cp}}{d_{cp}}$ $d_{cp} = \frac{1}{3}(a_{cp} + b_{cp} + c_{cp})$ $r_{cp} = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{4}$	горох	0.487
		соя	0.477
Заокругленні, у яких $\frac{a_{cp}}{b_{cp} + c_{cp}} \geq 1.5$	$Y = \frac{r_{cp}}{d_{cp}}$ $d_{cp} = \frac{1}{3}(a_{cp} + b_{cp} + c_{cp})$ $r_{cp} = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{4}$	ячмінь	0.563
		овес	0.446
		жито	0.59
Не округленні, у яких $a_{cp} \approx b_{cp} + c_{cp}$	$Y = \frac{r_{cp}}{d_{cp}}$ $d_{cp} = \frac{1}{3}(a_{cp} + b_{cp} + c_{cp})$ $r_{cp} = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{4}$	гречка	0.523
Не округленні, у яких $\frac{a_{cp}}{b_{cp} + c_{cp}} < 1.5$	$Y = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{2a_{cp}}$	кукурудза	0.58
		соняшник	0.45

Розміри зерен

Зерновий матеріал	Довжина a , мм	Ширина b , мм	Товщина c , мм
Пшениця	4.0-6.6	1.6-4.7	1.5-3.5
Жито	4.0-10.6	1.4-3.6	1.1-3.4
Ячмінь	7.0-14.5	2.0-5.0	1.4-4.5
Кукурудза	6.0-17.0	5.0-11.0	2.7-8.0
Рис	4.0-12.0	3.0-4.2	1.2-2.8
Просо	1.8-3.2	1.2-2.5	1.0-2.2
Гречка	4.2-8.0	2.8-5.2	2.0-4.2
Горох	4.0-8.0	3.7-8.8	3.5-8.0
Соняшник	7.5-15.0	3.5-8.6	1.7-6.0

Висновки до розділу 1.2

1. Шляхом аналізу класичних схем укладок зерен в шарі, що мають сферичну або округлену форму і однакові розміри, встановлено, що опір зсуву визначається необхідністю подолання пружних сил, що є складовими ущільнюючого тиску і сил тертя, що перешкоджають виходу зерен з зачеплення. Застосуванням методів теорії пружності для вирішення напружено – деформованого стану зернового шару при зсуві, отримана залежність для визначення сумарного дотичного напруження і відповідно, граничного допустимого зусилля зсуву.

2. Встановлено, що коефіцієнт опору зрушенню для пшениці від сил тертя становить $\mu = 0,186$, а це більше ніж опір від сил тертя у сухого піску. Це пояснюється виникненням капілярних сил зчеплення зерен внаслідок їх вологості.

3. Аналізом зсуву ідеалізованого шару встановлено, що величина абсолютного зсуву і величина кутової деформації відповідно залежить від розмірів частинок і їх співвідношення. У шару з ідеальними частками, що мають несферичну форму, кутова деформація визначається відношенням двох розмірів. Взаємне розташування реальних частинок в процесі зсуву, що визначає величину

кутової деформації буде визначатися трьома розмірами: довжиною (висотою), шириною і товщиною.

4. На підставі аналізу фізичної моделі процесу переходу від пухкої до щільної упаковці зерен, що супроводжується кутовою деформацією елементів шару і зміною його пористості, встановлена залежність для визначення ефективного коефіцієнта зсуву. Встановлено, що виходу зерен з зачеплення при зсуві перешкоджають сили тертя кочення внаслідок обертання зерен при їх видавлюванні, при цьому отримана залежність, яка визначає значення коефіцієнту тертя кочення, як різниці коефіцієнту зсуву і кутової деформації.

5. Встановлено, що пружність і опір зсуву визначається необхідністю подолання сил від дії ортогональних дотичних напружень, внаслідок кутової деформації структури укладання зернин і дотичних напружень тертя кочення при виході зернин із зачеплення.

6. Шляхом аналізу дотичних напружень від ортогонального тертя і опору зсуву при ковзанні частинок вниз у процесі утворення осесиметричного укусу встановлена залежність для визначення коефіцієнта зсуву по параметрам укусу.

7. Визначені значення відносної кутової деформації зсуву Y для різних зернових культур. Для пшениці $Y = 0,520$; проса – $0,492$; гороха – $0,487$; сої – $0,477$; ячмінь – $0,563$; овес – $0,446$; жито – $0,590$; гречка – $0,523$; кукурудза – $0,580$; соняшник – $0,450$.

1.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОВШІВ ЗЕРНОВИХ НОРІЙ

Зниження продуктивності норії в порівнянні з розрахунковою може відбуватися з двох причин: освітою зворотного висипу в робочу і холосту трубу, а також неповним заповненням ковшів в процесі їх завантаження в башмаку норії. Завантаження ковшів норії, як відомо, проводиться одним з трьох способів:

- зачерпування матеріалу з насипу в бункері з подальшим досипанням з приймального лотка проти ходу тягового елемента;
- зачерпування з насипу з подачею матеріалу з приймального лотку по ходу тягового елемента;
- зачерпування матеріалу з насипу (купи), що утворюється в певному просторі різними способами.

Зачерпування з насипу є початковим етапом для першого способу заповнення, та основним – для другого і третього. Зачерпування з насипу в основному і визначає ступінь заповнення ковшів, яку в розрахунках оцінюють коефіцієнтом заповнення.

1.3.1. Дослідження процесу заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу

1.3.1.1. Обґрунтування фізичної моделі процесу зачерпування

На підставі попереднього спостереження зачерпування матеріалу, розташованого в ящику з прозорими стінами; була прийнята наступна модель процесу зачерпування. Перший ківш і кілька розташованих за ним заглиблюються в насип, повністю заповнюються, і при подальшому русі прорізають в насипу циліндричний канал прямокутної форми. При встановленому режимі роботи кожен ківш заповнюється по лінії водного рівня в нижній частині відкосу, обсіпання матеріалу при певному куті повороту барабана, залежить від кута природного укосу насипу. При подальшому русі

ковша по циліндричному каналу, під дією складових відцентрової сили і сили тяжіння відбувається поступове витікання слоїв матеріалу з ковша, що зменшує його заповнення. Витискання шару буде відбуватися вздовж нижньої стінки ковша з-під основного масиву матеріалу в ковші. Це обумовлено тим, що в цій зоні зсувна складова відцентрової сили буде найбільшою. При цьому опір зрушенню між частинками буде зменшуватись від низу до верху, формуючи висоту шару; верхня гранична частина якого, буде пухкою. Таким чином утворився нижній шар, що буде без опору зміщуватися щодо вище розміщеної пухкої частини матеріалу, яка обсіпаючись буде підживлювати нижній шар.

Обсяг спливаючого шару буде визначатися швидкістю ковзання по стінці ковша і товщиною шару, в залежності від положення ковша на дузі зачерпування.

1.3.1.2. Динаміка руху частинок шару по похилій поверхні, що обертається у вертикальній площині щодо центру обертання

Рух частинок матеріалу по похилій площині, що обертається у вертикальній площині поверхні необхідно вирішувати щодо швидкості її ковзання під дією системи змінних сил з урахуванням сили Коріоліса, яка є однією зі складових сили нормального тиску на шар (рис. 1.10) [30, 31, 13, 32]. У векторній формі рівняння руху частинки M під дією прикладених до неї сил можна записати як:

$$m\vec{a} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_{TP}, \quad (1.35)$$

де $G = mg$ – сила тяжіння;

N – реакція зв'язку (сила тиску стінки на частку);

$F_{TP} = f \cdot N$ – сила тертя;

a – сумарне прискорення частинки;

f – коефіцієнт тертя.

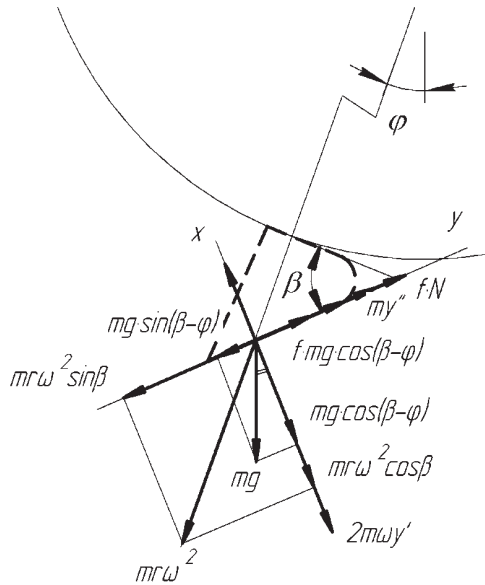


Рис. 1.10. Сили, діючі на частинку шару в ковші

В проекціях на осі координат $Y - X$, де вісь Y направлена вздовж стінки, а вісь X – по нормалі до поверхні, отримуємо наступні рівняння:

$$\begin{aligned} \sum Y = 0: & m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta + m \cdot g \cdot \sin(\beta - \phi) - m \cdot y'' - N \cdot f = 0 \\ \sum X = 0: & N - m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta + m \cdot g \cdot \cos(\beta - \phi) - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot y' = 0 \end{aligned} \quad (1.36)$$

- де $m \cdot r \cdot \omega^2$ – відцентрова сила;
 $m \cdot y''$ – сила інерції;
 $2 \cdot m \cdot \omega \cdot y'$ ($y' = \vartheta_C$) – сила Коріоліса;
 β – кут зачерпування ковша;
 ω – кутова швидкість;
 ϑ_C – швидкість шару.

З другого рівняння отримаємо вираз для N і підставивши їх у перше, скоротивши на m , після деяких перетворень отримаємо диференціальне рівняння, руху частки шару:

$$y'' + 2f \cdot \omega \cdot y' = r \cdot \omega^2 (\sin \beta - f \cos \beta) + g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]. \quad (1.37)$$

Рішення цього неоднорідного рівняння другого порядку має вигляд:

$$y = y_1 + y_2, \quad (1.38)$$

де y_1 – спільний розв’язок однорідного рівняння (1.37):

$$y_1 = C_1 e^{K_1 t} + C_2 e^{K_2 t}, \quad (1.39)$$

y_2 – частковий розв’язок неоднорідного рівняння (1.37):

$$y_2 = t^K e^{\alpha t} [p(t) \cos \beta \cdot t + q(t) \sin bt]. \quad (1.40)$$

Значення y_1 визначаємо шляхом розв’язку лінійного однорідного рівняння, відповідного рівняння (1.37):

$$y'' + 2f \cdot \omega \cdot y' = 0. \quad (1.41)$$

Характеристичним рівнянням для (1.41) буде:

$$K^2 + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot K = 0. \quad (1.42)$$

Корні цього квадратного рівняння:

$$K_1 = 0, K_2 = -2 \cdot f \cdot \omega.$$

Тоді рівняння (1.39) приймає вигляд:

$$y_1 = C_1 + C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t}. \quad (1.43)$$

Значення y_2 визначаємо з умови, що права частина неоднорідного рівняння (1.37) не містить множник $e^{\alpha t}$, а також не містить тригонометричних функцій з аргументом t , при цьому багаточлени $p(t)$ і $q(t)$ має нульову ступінь. Отже, $\alpha = \beta = 0$ і $K = 1$. Тоді $y_2 = \Phi \cdot t$, де Φ постійний множник, який визначаємо шляхом підстановки отриманого значення y_2 в рівнянні (1.37) і обчисленням першої і другої похідних. В результаті отримаємо:

$$2f \cdot \omega \cdot \Phi = r \cdot \omega^2 (\sin \beta - f \cos \beta) + g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)],$$

Звідки:

$$\Phi = \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}$$

остаточно:

$$y_2 = \Phi \cdot t = \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \quad (1.44)$$

Рівняння (1.38) з підстановкою значень y_1 та y_2 приймають вигляд:

$$y = C_1 + C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \quad (1.45)$$

Перша похідна рівняння (1.45) дорівнює:

$$y' = \frac{dy}{dt} = -2 \cdot f \cdot \omega \cdot C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{r \cdot \omega \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}. \quad (1.46)$$

Беручи початкові умови, згідно з якими при $t=0$ $y=y_0$, $x'=0$, $y'=0$ з рівнянь (1.45) та (1.46) отримаємо:

$$y_0 = C_1 + C_2;$$

$$0 = -2 \cdot f \cdot \omega \cdot C_2 + \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}.$$

Із системи цих двох рівнянь отримаємо значення довільних постійних C_1 і C_2 :

$$C_2 = \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2};$$

$$C_1 = y_0 - \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2}.$$

З урахуванням C_1 та C_2 рівняння (1.45) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} y = & y_0 - \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2} + \\ & + \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{r \cdot \omega(\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \end{aligned} \quad (1.47)$$

Швидкість ковзання частинки шару по стінці ковша дорівнює першій похідній шляху y по часу t отримаємо з рівняння (1.47):

$$\begin{aligned} g_c = \frac{dy}{dt} = & - \frac{r \cdot \omega(\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{r \cdot \omega(\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}. \end{aligned} \quad (1.48)$$

Враховуємо, що:

$$\sin \beta \cdot \cos \rho - \sin \rho \cos \beta = \sin(\beta - \rho);$$

$$\sin(\beta - \phi) \cdot \cos \rho - \sin \rho \cdot \cos(\beta - \phi) = \sin(\beta - \phi - \rho),$$

тоді рівняння (1.48) отримає вигляд:

$$g_c = \left[\frac{r \cdot \omega \cdot \sin(\beta - \rho)}{2 \sin \rho} + \frac{g \cdot \sin(\beta - \phi - \rho)}{2 \cdot \omega \cdot \sin \rho} \right] \cdot (1 - e^{-2 \cdot f \cdot \omega t}), \quad (1.49)$$

де $\omega \cdot t = \varphi$ – кут повороту ковша щодо вертикальної осі барабана;

$r = r_K$ – радіус ковша по зачерпуваючій крайці, що визначає швидкість виходу шару.

При закінченні ущільненого шару коефіцієнт тертя буде узагальненою величиною, та визначається сумою коефіцієнта тертя ковзання частинок по днищу ковша і коефіцієнта тертя перекочування частинок в нижній частині шару.

Таким чином, узагальнений коефіцієнт тертя можна представити як:

$$f = K_d (f_c + \mu),$$

де: $K_d = 0,7 - 0,9$ – загальноприйнятий коефіцієнт зменшення тертя при русі [57].

1.3.1.3. Визначення товщини витисненого шару, що витискається і коефіцієнта заповнення

Втрата спочатку зачерпнутого обсягу буде визначатися швидкістю витікання і товщиною шару. Товщину шару можна визначити з умови рівноваги шару під дією рушійних сил і сил опору. Рушійною силою з урахуванням тертя по стінці ковша (рис. 1.11) буде сила:

$$F^* = mg \left\{ R_h \cdot \omega^2 (\sin \beta - f' \cos \beta) + g \left[\sin(\beta - \phi) - f' \cos(\beta - \phi) \right] \right\}$$

або:

$$F^* = \gamma \cdot g \cdot L \cdot h^1 \cdot A \left\{ R_h \cdot \omega^2 (\sin \beta - f \cos \beta) + g \left[\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi) \right] \right\}, \quad (1.50)$$

де: γ – об'ємна вага матеріалу;

$L = K \cdot B \cdot \sin \beta$ – довжина підстави шару (рис. 1.12);

B – виліт ковша;

β – кут зачерпування;

A – ширина ковша;

R_h – радіус центра ваги шару;

ω – кутова швидкість;

h – товщина шару;

f' – узагальнений коефіцієнт тертя;

$K = 1,15 \dots 1,2$ – коефіцієнт, враховуючий кривизну стінки.

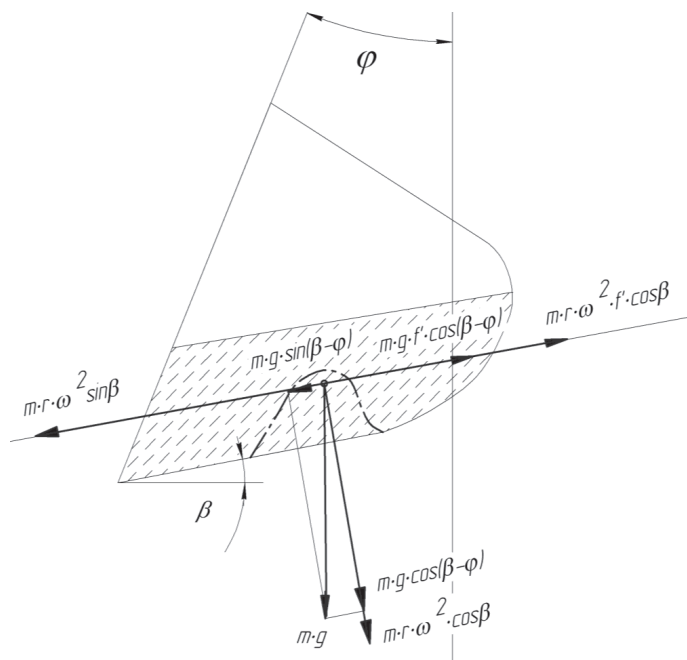


Рис. 1.11. Схема сил, що діють на шар.

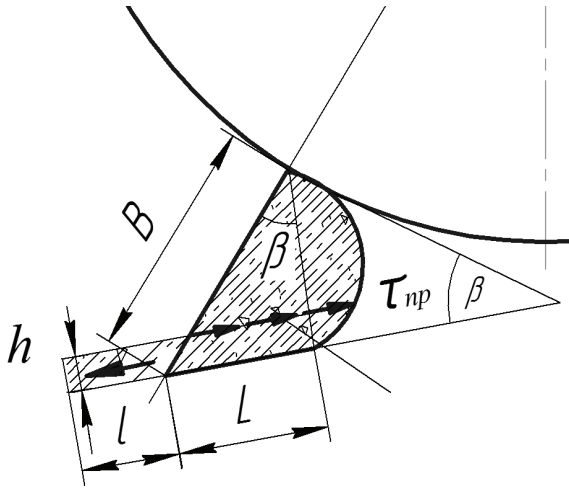


Рис. 1.12. Параметри шару, що витікає з ковша

Сила опору внаслідок зсуву верхньої частини шару щодо масиву дорівнюватиме:

$$F_C = \tau_{\text{ІП}} \cdot A \cdot L. \quad (1.51)$$

З умови рівноваги отримаємо попереднє значення товщини шару:

$$h' = \frac{\tau_{\text{ІП}}}{\gamma \left\{ R_h \cdot \omega^2 (\sin \beta - f' \cos \beta) + g [\sin(\beta - \phi) - f' \cos(\beta - \phi)] \right\}}. \quad (1.52)$$

З формули (1.52) визначено, що величина h' буде функцією кута повороту ϕ , у зв'язку з чим необхідно визначити початок відліку кута та початковий об'єм V_0 зачерпнутого матеріалу. На рис. 1.13 наведено схему зачерпуння матеріалу з насипу з кутом природного відкосу ρ .

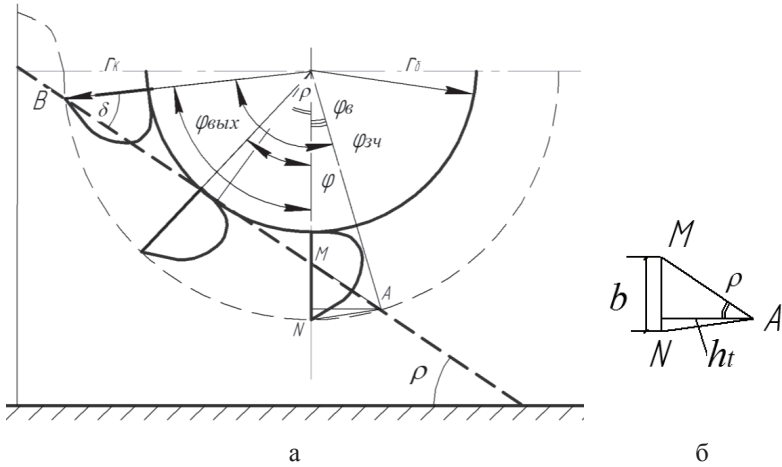


Рис. 1.13. Схема зачерпування матеріалу з насипу

Кут ρ визначимо з урахуванням зменшення кута відкосу в процесі руху зернового матеріалу і вібрації бункера:

$$\rho = K \cdot \rho_0,$$

де $K = 0,7$ – загальноприйнятий мінімальний коефіцієнт зменшення тертя при русі;

ρ_0 – кут відкосу в стані спокою.

У відповідності зі схемою кут входу: $\varphi_{вх} = \varphi_{зч} - [(90 - \delta) + \rho]$ відраховується від вертикальної осі, що проходить через центр обертання в бік, протилежний напрямку обертання.

Кут зачерпування визначається:

$$\varphi_{зч} = 2(90 - \delta), \text{ де } \delta = \arcsin \frac{r_B}{r_K}.$$

Кут виходу складатиме:

$$\phi_{\text{ВЫХ}} = (90 - \delta) + \rho.$$

Щоб встановити можливість початку закінчення, необхідно визначити обсяг зачерпування при повороті ковша на кут ϕ_B .

Об'єм, що зачерпується визначається бічною поверхнею трикутника AMN (рис. 1.13, б). Площа трикутника складатиме:

$$S = \frac{1}{2} \cdot b \cdot h_t,$$

де: $b = r_K - r_B / \cos \rho$, $h_t = r_K \sin \phi_B$

Об'єм, що зачерпується:

$$V_o = S \cdot A,$$

де: A – ширина ковша.

За початок відліку поточного кута повороту φ , відповідного початку витікання, необхідно приймати вертикальну вісь, що проходить через центр обертання, а в якості мінімального початкового об'єму матеріалу в ковші- обсяг V_0 .

Розбиваючи сумарний кут повороту, рівний $\pi/2$, на n частин, за умови, що n має бути більшою за кількість ковшів на дузі $\pi/2$, визначаємо, відповідно до вираження (1.52), попереднє значення h' для кожного наступного кута, відрахованого від вертикальної осі.

Для визначення уточненого значення товщини шару спочатку необхідно визначити його початкове значення h_0 відповідно до залежності (1.52) при $\varphi=0$ і об'єму зерна в ковші V_0 , приймаючи значення R_h рівним радіусу зачерпуваної кромці ковша. Наведене дотичне напруження при зсуві частинок по всій товщині шару буде залежати від початкового тертя по стінці ковша і визначатися як:

$$\tau_{\text{ПР}} = p_0 \frac{\lambda}{f_c'}, \quad (1.53)$$

де: λ – коефіцієнт зсуву зернового шару для даного зернового матеріалу;
 f_c' – наведений коефіцієнт тертя ковзання.

$$p_0 = \frac{\gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \cos \beta}{A \cdot L}, \quad (1.54)$$

де: β – кут зачерпування ковша.

Дослідженням процесу зсуву шару, з переходом від пухкої структури до щільної і навпаки, встановлено, що опір зрушенню визначається величиною дотичних напружень. Крім кутової деформації $Y = 0,5$ для заокруглених частинок шару зернових, дотичні напруження виникають і від сил тертя кочення при вході і виході зерен із зачеплення (при перекочуванні). У цьому випадку коефіцієнт тертя кочення визначається як:

$$\mu_k = \lambda - Y.$$

Наприклад, для пшениці з вологістю 14,6 % за методом Е. Дженіке встановлено коефіцієнт $\lambda = 0,686$, відповідно $\mu_k = 0,186$. Отримане значення, як для коефіцієнта тертя кочення, є великим. Це пояснюється тим, що зернові культури мають додаткові капілярні містки зв'язку [34, 35, 36–38]. При витіканні шару по дну ковша узагальнений коефіцієнт тертя руху в залежності (1.53) і (1.54) необхідно обчислювати, як:

$$f' = K_g (f_c + \mu_k), \quad (1.55)$$

де: $K_g = (0,6 \dots 0,65)$ – коефіцієнт зменшення з урахуванням малої швидкості ковзання, відповідно до законів фізики тертя при малих питомих тисках [24].

При зсуві відбувається зменшення товщини шару внаслідок переходу до щільної структури і уточнене значення його товщини буде визначатися при будь-якому положенні ковша, як:

$$h = h' \cdot \frac{Y}{\lambda}, \quad (1.56)$$

При визначенні товщини шару при заданому куті повороту нормальний ущільнюючий тиск буде визначатися сумою тиску маси матеріалу в ковші p_M і тиск від дії центр обіжної сили p_C :

$$p_C = p_M + p_{Ц}. \quad (1.57)$$

Відповідно:

$$p_M = \frac{\Delta V_{OCT} \cdot \gamma \cdot g \cdot \cos(\beta - \phi)}{A \cdot L}; \quad (1.58)$$

$$p_C = \frac{\Delta V_{OCT} \cdot \gamma \cdot R_M \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}{A \cdot L}, \quad (1.59)$$

де: R_M – радіус центра ваги маси зерна в ковші, залежить від положення ковша;

ΔV_{OCT} – залишковий обсяг при попередньому положенні ковша.

Відповідно:

$$\tau_{IP} = p_C \frac{\lambda}{f}.$$

Графічний аналіз (рис. 1.14) показує, що кут тиску α визначається положенням центра ваги основного масиву матеріалу в ковші і практично не змінюється при повороті ковша. Для ковшів типу EURO [38–40]: $\alpha = \arctg \frac{\Delta L}{b}$,

де $\Delta L = 0,32L$; $b = 0,9 \cdot B \cdot \cos \beta$.

Графічне і чисельне дослідження показують, що значення R_M та R_h можна визначити за емпіричними залежностями:

$$R_M = R_C + 2 \left(h_0 + \frac{h^*}{h_0} \right), \quad (1.60)$$

$$R_h = R_K - 2,5 \left(h_0 + \frac{h^*}{h_0} \right), \quad (1.61)$$

де: $R_C = (r_B + y_C)$ – радіус центру ваги матеріалу в ковші з об’ємом по водному рівню V_{Z3} ;

h^* – товщина шару в попередньому положенні;

y_C – координата центра ваги матеріалу по водному рівню;

r_B – радіус барабана.

Так, наприклад, для ковша європейського стандарту тип SPS – $\alpha \approx 30^\circ$. Об’єм шару витісненого з ковша при заданому положенні визначається як:

$$V_B = g_C \cdot \frac{\phi'}{\omega} \cdot h \cdot A, \quad (1.62)$$

де g_C – швидкість ковзання при заданому положенні ковша;

ϕ' – кутовий крок (на рад) ковшів при рівномірному розподілі ковшів на дузі $\pi/2$.

Остаточний об’єм зернового масиву в ковші при заданому положенні ковша визначається як:

$$\Delta V_{OCT} = \Delta V'_{OCT} - V_B, \quad (1.63)$$

де: $\Delta V'_{ост}$ – залишковий об'єм в попередньому положенні ковша;
 V_b – об'єм витісненого матеріалу при даному положенні ковша.

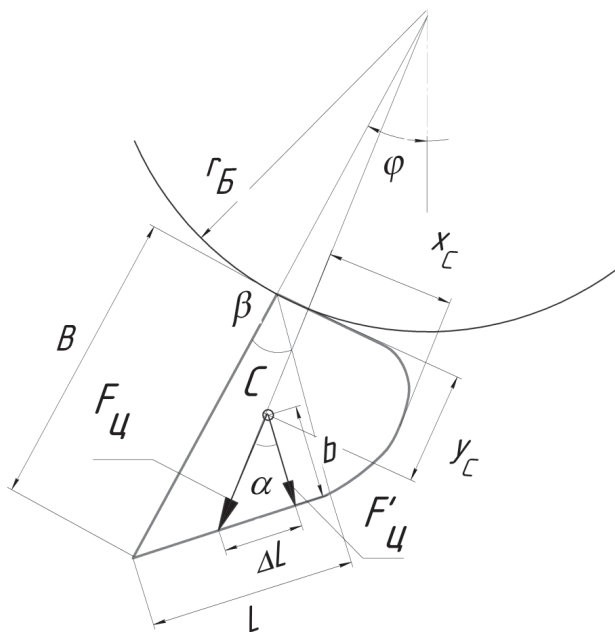


Рис. 1.14. Схема визначення кута тиску складової відцентрової сили

У процесі виходу зернового шару обсяг основного масиву матеріалу в ковші зменшується. При повороті на кут $\varphi > 45^\circ$ може наступити момент, коли:

$$V_h > V_{ост.п},$$

де: $V_h = h_p \cdot A \cdot L$ – об'єм шару при розрахунку по залежності (1.52);
 h_p – товщина шару;

$V_{ост.п}$ – залишковий об'єм матеріалу при попередньому положенні ковша.

При цьому умови закінчення шару по стінці ковша буде відбуватися без опору зрушенню на його верхній поверхні. В цьому випадку товщину шару необхідно визначити як:

$$h = \frac{V_{ост.п}}{L \cdot A}. \quad (1.64)$$

Коефіцієнти заповнення ковша по відношенню до його об'єму по водному рівню V_{z3} та до об'єму повного заповнення V_{z2} визначаються як:

$$\psi_{z3} = \frac{\Delta V_{ост}}{V_{z3}}; \quad \psi_{z2} = \frac{\Delta V_{ост}}{V_{z2}}.$$

1.3.1.4. Результати розрахунків процесу завантаження

У табл. 1.3 наведені параметри втрати обсягу в процесі зачерпування, для норії продуктивністю 100 т/год при швидкості стрічки $\mathcal{G}_n = 2,4 \text{ м/с}$. Значення параметрів отримані для пшениці вологістю $W = 12.4\%$, об'ємною вагою 800 кг/м³. Розрахунок проводиться при зачерпуванні поліуретановим ковшем типу SPS-280-18D HDP, параметри якого склали: ширина $A = 290$ мм, виліт $B = 185$ мм, об'єм по водному рівню $V_{z3} = 3,3$ л, повний об'єм $V_{z2} = 4,2$ л, кут зачерпування $\beta = 40^\circ$, $y_C = 74,1$ мм. Коефіцієнт тертя пшениці по пластмасі $f = 0.22$ [16], ефективний коефіцієнт зсуву склав $\lambda = 0,686$, коефіцієнт тертя кочення зерен $\mu_K = 0,186$.

Параметри втрати об'єму в процесі зачерпування

Кут повороту, град.	Швидкість витікання, м/с	Товщина шару, мм	Обсяг виходу, л	Залишковий обсяг, л	Коефіцієнт заповнення за водним рівнем, для V_{Z3}	Коефіцієнт заповнення по повному обсягу V_{Z2}
Φ	v_c	h	$V_{вых}$	$\Delta V_{ост}$	Ψ_{Z3}	Ψ_{Z2}
15	0,539	33,56	0,227	3,073	0,931	0,731
30	0,671	43,0	0,352	2,721	0,824	0,647
45	0,684	57,7	0,488	2,23	0,675	0,531
60	0,686	54,0	0,572	1,658	0,502	0,396
75	0,698	40,0	0,343	1,33	0,4	0,317
90	0,456	32,5	0,179	1,151	0,348	0,274

Характер змін параметрів зачерпування представлено на рис. 1.15.

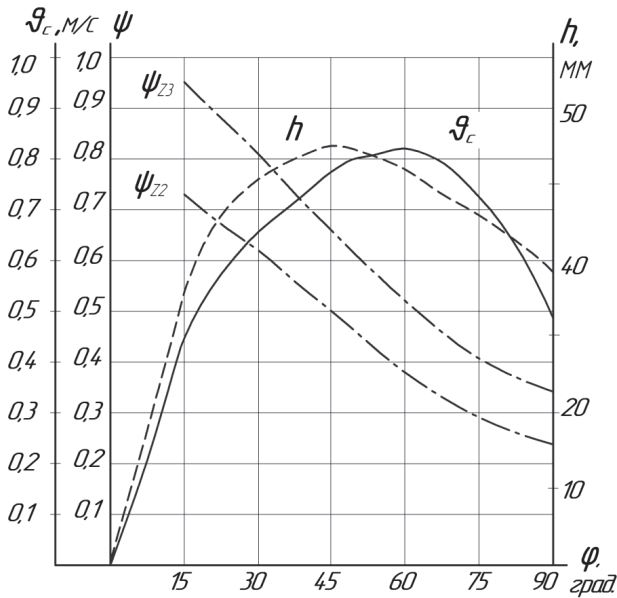


Рис. 1.15. Залежності швидкості витікання v_c , товщини шару h , коефіцієнту заповнення ковшів ψ_{Z3} від кута повороту барабана ϕ при зачерпуванні.

При зачерпуванні по ходу тягового органу процес видавлювання шару матеріалу з ковша при його русі щодо центру повороту буде таким, як і при зачерпуванні з насипу з тією лише різницею, що початковий обсяг зачерпування буде дорівнювати повному обсягу ковша V_{z2} , так як вичерпування починається на стадії надходження матеріалу з завантажувального лотку.

В наведеному випадку (табл. 1.3) об'єм виходу матеріалу з ковша складатиме 2,149 л. При повному об'ємі початкового зачерпування $V_{z2} = 4,2 \text{ л}$. Остаточний обсяг в ковші складе $\Delta V_{oct} = 4,2 - 2,149 = 2,051 \text{ л}$. В цьому випадку коефіцієнт заповнення по водному рівню буде дорівнювати:

$$\psi_{z3} = \frac{2,051}{3,3} = 0,6215.$$

Таким чином, при зачерпуванні зернового матеріалу по ходу завантаження норії коефіцієнт заповнення буде значно більше в порівнянні з коефіцієнтом заповнення просто з насипу.

Отримані залежності показують, що втрати обсягу в процесі зачерпування залежать від об'ємної маси зернового матеріалу, від його коефіцієнту тертя по днищу ковша, ефективного коефіцієнта опору зрушенню, і головним чином, від швидкості тягового органу.

Зачерпування з насипу без додаткового завантаження супроводжується низьким коефіцієнтом заповнення ковшів навіть при швидкостях сприятливих з точки зору найбільш ефективного відцентрового розвантаження.

Тому при проектуванні норій без додаткового завантаження, наприклад, при зачерпуванні з насипу на відкритих майданчиках, в завальних ямах, в трюмах суховантажів і барж, необхідно шукати оптимальні співвідношення між швидкістю і значенням питомого навантаження на робочу гілку.

1.3.2. Визначення конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів норій проти ходу тягового елемента

Завантаження ковшів норії проти ходу тягового органу є найбільш поширеною і в той же час найбільш складною технологічною операцією. Це пояснюється тим, що заповнення ковшів здійснюється частково шляхом зачерпування з насипу в бункері башмака норії і частково – досипанням з завантажувального лотка. Друга, фінішна частина процесу, є особливо важливою, тому що від неї залежить забезпечення необхідного рівня заповнення ковшів, але і поповнення рівня насипу в бункері для стабільного процесу зачерпування. У зв'язку з цим, важливим завданням є визначення конструктивно-кінематичних параметрів заповнення, як ковшів, так і бункера при завантаженні з живлячого лотка.

Аналіз робіт, присвячених дослідженню процесу розвантаження [3, 23, 41–43], дозволять визначити основні умови раціонального завантаження ковшів.

Перша вимога полягає в тому, що об'єм заповнення ковшів, отриманий зачерпуванням з насипу і подальшим досипанням з живлячого лотка, не повинен бути більше об'єму ковша за водним рівнем V_{z3} . Переповнений ківш сприяє утворенню значного зворотного сипу, як в робочу, так і в холосту труби, так як не встигає повністю розвантажитися практично при всіх кінематичних режимах розвантаження.

Друга вимога визначає необхідність балансу об'єму матеріалу в ковші, що скидається в бункер, для підтримки необхідного для зачерпування рівня насипу.

Третя вимога – конструктивно-кінематичні параметри завантаження повинні не допускати утворення заторів в живильному лотку, що порушують процес досипання матеріалу у ковші.

1.3.2.1. Фізичні основи витікання зернового матеріалу з живлячого лотку

Відомо, що характер «закінчення сипких матеріалів» визначається кутом нахилу робочої площини спуску. В роботах [43,44] визначено, що характер «закінчення» залежить від співвідношення кута нахилу і кутів зовнішнього і внутрішнього тертя. При $\rho_0 < \theta < \rho$, де ρ і ρ_0 – відповідно кути внутрішнього і зовнішнього тертя сипкого матеріалу, сили зчеплення між частинками не порушуватимуться і стан матеріалу при русі буде зв'язком. За умови $\theta > \rho$ сили зчеплення будуть порушені, стан матеріалу при переміщенні буде незв'язним, тобто пухким. Очевидно, опір переміщенню незв'язного матеріалу буде менше, ніж у зв'язного, а розрив зв'язків між частинками відбувається в результаті їх перекочування при виході із зачеплення.

При русі зернового матеріалу по площині, сили тертя ковзання будуть викликати в пухкій структурі шару від прокручування частинок щодо одна одної, і цим збільшувати опір витікання. Це дозволяє структурувати значення коефіцієнта тертя при русі сипкого матеріалу по площині. Як суму коефіцієнтів тертя ковзання і тертя кочення, і його значення можна визначити як:

$$f^* = 0,8(f_c + f_k), \quad (1.65)$$

де: f_c – коефіцієнт зовнішнього тертя (по сталі, по пластику);

0,9 – загально прийнятий середній коефіцієнт зменшення тертя при русі.

Ця залежність має місце тільки в тому випадку коли $f_c > f_k$, якщо $f_c > f_k$, то $f^* = f_c$. В практичних розрахунках можна приймати значення f_k (1.65) рівним коефіцієнту тертя кочення частинок при їх виході із зачеплення $f_k = \lambda - Y$.

Оскільки коефіцієнт тертя кочення визначається величиною деформації стиснення, то для порівняно м'яких зернових матеріалів, він може досягати значної величини в порівнянні з коефіцієнтом при коченні більш твердих тіл. В одній з останніх робіт [45], було встановлено, що при кутах нахилу опорної поверхні, тангенс кута яких перевищує 0,35, рух потоку носить лавиноподібний характер. За допомогою спеціальних лазерних датчиків встановлені фізичні особливості і параметри руху потоку. Закінчення супроводжувалося утворенням хвилі, що збільшує висоту потоку до кінця спуску зі зміною швидкості верхнього шару.

Випробуванню піддавалися два матеріали: сухий пісок та суміш скляних намистинок. Для більш шорстких піщинок лавина була великою, частки в її верхній частині рухались швидше, ніж її фронт. З збільшення тангенсу кута нахилу від 0,35 до 0,6, висота потоку збільшувалася відповідно в 1,3 та 3,5 рази. Автори наводять гідродинамічну модель, що підтверджує відтворенню хвилі.

При кутах нахилу робочої поверхні лотка зазвичай 45–60°, лавиноподібний рух потоку зерна може зіграти негативну роль при заповненні ковшів, тому цей фактор вимагає врахування при виборі їх кроку. Структурна зміна зернового потоку і зміна його параметрів, вимагають окремого дослідження. Початкова швидкість вільного падіння тіла в разі зміни траєкторії, при падінні на похилу поверхню, дає меншу складову сумарної швидкості потоку. Отримані значення коефіцієнта зменшення K_0 в залежності від кута повороту (кут відхилення траєкторії від вертикалі) наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Залежність коефіцієнта K_0 від кута повороту

Кут повороту, град	10	20	30	40	50	55	60	70	80	90
Коефіцієнт K_0	0,98	0,93	0,87	0,77	0,65	0,58	0,5	0,35	0,18	0

Коефіцієнт K_0 знижується від 0,98 при 10° до 0 при прямому куті (табл. 1.4).

Швидкість в кінці лотка з урахуванням уповільнення визначають зазвичай з рівняння живих сил:

$$\frac{m\mathcal{G}^2}{2} - \frac{m\mathcal{G}_H^2}{2} = m \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta - m \cdot g \cdot L \cdot f^* \cdot \cos \theta, \quad (1.66)$$

де: L – довжина руху.

При верхній подачі матеріалу вираз для швидкості отримаємо у вигляді:

$$\mathcal{G}_H = \sqrt{\frac{2gH_1 \cdot (\sin \theta + f \cdot \cos \theta)}{\sin \theta} + K_0^2 \mathcal{G}_H^2} \quad (1.67)$$

де: $\mathcal{G}_H = \mathcal{G}_0 \cdot K_\theta$ – початкова швидкість руху по лотку;

$\mathcal{G}_0 = \sqrt{2gH_2}$ – швидкість падіння матеріалу з живильника;

K_θ – коефіцієнт зменшення швидкості \mathcal{G}_0 , $H_1 = H - H_2 = H - l \cdot \operatorname{tg} \theta$

Попередню висоту лотка можна визначити як:

$$H = \frac{\mathcal{G}_0^2 \cdot \sin \theta}{2g(\sin \theta - f \cdot \cos \theta)}, \quad (1.68)$$

де: $\mathcal{G}_H = \mathcal{G}_L \frac{a+B}{t_K}$ – попереднє значення швидкості для створення

необхідного обсягу живильного потоку, або як $\mathcal{G}_H \approx 1,2 \cdot \mathcal{G}_L$;

\mathcal{G}_L – швидкість стрічки;

a – зазор між стінкою бункера і черпаючою крайкою ковша;

B – виліт ковша;

t_K – крок ковшів.

Таким чином можна визначити швидкість потоку в разі повздовжньої подачі матеріалу, при якій приймальний люк встановлюється на похилій частині кришці лотка.

Враховуючі гідравлічний характер витікання незв'язного матеріалу, висота потоку на основній частині руху можна визначити як:

$$h = \frac{Q_{л}}{g_{л} \cdot A},$$

де: $Q_{л} = \frac{П \cdot 10^3}{3,6 \cdot \gamma}$ – витрата лотка (м³/с);

$П$ – продуктивність норії (т/год);

γ – насипна маса вантажу (кг/м³);

A – ширина лотка.

Максимальна висота потоку на виході буде визначатися висотою хвилі. Утворення хвилі при закінченні зернового матеріалу буде викликано поступовим, пошаровим виходом частинок із зачеплення внаслідок гальмування нижнього шару через тертя. При цьому утворюється пухка структура зі зміною пористості. З огляду на ці фактори максимальну висоту потоку можна визначити як:

$$h_{\max} = h \cdot \frac{m}{n} \cdot (1 + f_c) \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (1.69)$$

де: n – пористість щільної структури;

m – пористість пухкої структури.

Допустима висота потоку визначається як:

$$[h_{\max}] = \sin \theta \left(t_K - \frac{\Delta}{\sin \beta} - \delta \cdot \operatorname{tg} \theta \right) \cdot \cos \theta, \quad (1.70)$$

де: Δ – заданий зазор між потоком і стінкою ковша при заданому куті черпання β ;

δ – рекомендований (необхідний) параметр входу потоку в ківш $\delta = (0,2 - 0,25)B$, де B – виліт ковша.

Відповідно до першої умови число ковшів необхідно визначити за об'ємом водного рівня без урахування коефіцієнта заповнення. Таким чином, попередньо число ковшів на 1 м визнається як:

$$n'_K = \frac{P \cdot 10^3}{3.6 \cdot \mathcal{G}_L \cdot V_{Z3} \cdot \gamma}, \quad (1.71)$$

де: P – продуктивність, т/год;

\mathcal{G}_L – швидкість стрічки, м/с;

V_{Z3} – об'єм по водному рівню ($Z3$ – по міжнародному стандарту), л;

γ – насипна маса, кг/м³.

Необхідне число ковшів n_K з технологічним кроком має задовольняти співвідношенню: $n'_K < n_K < n_{K\max}$, де $n_{K\max}$ – максимальне допустиме число ковшів (1/м) по міжнародному стандарту.

Попередню висоту установки лотка можна визначити як:

$$Z = (a + \delta) \cdot \operatorname{tg} \theta.$$

Об'єм відсіченою частини потоку, що надходить у ківш:

$$V_{no} = \left(d \cdot h + \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \right) A, \quad (1.72)$$

де: $d = e - c$, $b = h \cdot \operatorname{tg} \beta$, $e = \mathcal{G}_n \cdot \tau$,

τ – час закінчення потоку після виходу з лотка.

Процес зрізу наповнюючої частини потоку, супроводжується незначною втратою обсягу, внаслідок ударної, невідкидаючої дії черпальної крайки ковша. Аналіз вказує, що цей ефект можна враховувати шляхом зменшення часу витікання, який в цьому випадку визначається як:

$$\tau = \frac{t_K - 0,25h / \cos \beta}{\mathcal{G}_n}, \quad (1.73)$$

де: β – кут зачерпування ковша.

Об'єм не відсіченої частини потоку складе:

$$V_{III} = \frac{A \cdot h \cdot a}{\cos \theta}. \quad (1.74)$$

Об'єм матеріалу в заповненому ковші і коефіцієнт його заповнення по водному і повному рівню:

$$\left. \begin{aligned} V_K &= V_{по} + V_{ост} \\ \psi_{Z3} &= \frac{V_K}{V_{Z3}}, \psi_{Z2} = \frac{V_K}{V_{Z2}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.75)$$

де: $V_{ост}$ – залишковий обсяг у ковші після зачерпування з насипу.

Друга умова, що визначає необхідність балансу обсягів, зачерпнутого з насипу і того, що надходить в насип, визначається рівністю:

$$V_{3AЧ} = V_Z,$$

де: $V_{3AЧ}$ – повинен відповідати V_{Z3} ;

V_Z – забезпечується скинутими об'ємами не відсіченої частини потоку $V_{ПН}$ і витісненою з ковша частиною при зачерпуванні V_{KB} , відповідно:

$$V_Z = V_{ПН} + V_{KB}. \quad (1.76)$$

Необхідний коефіцієнт заповнення необхідно визначати, як:

$$\psi_Z = \frac{Q_{\mathcal{L}}}{Q_H}, \quad (1.77)$$

де: $Q_H = g_{\mathcal{L}} \cdot n_K \cdot V_{Z3}$ – розрахункова витрата норії.

Що стосується, визначення коефіцієнтів заповнення по ходу, то їх розрахунок необхідно проводити за тими ж залежностям, які були отримані для зачерпування з насипу, розташованої проти ходу.

Але при цьому необхідно виходити з того, що вихідним обсягом зачерпування є повний обсяг V_{Z2} .

У цьому випадку коефіцієнт заповнення виходить більше, ніж коефіцієнт заповнення при зачерпуванні з насипу, що підтверджується досвідом експлуатації ковшових норій.

1.3.2.3. Обґрунтування оптимальної висоти установки живильного лотка

У розділі 1.1 проаналізовано різні джерела та визначені рекомендації про необхідність установки лотка вище горизонтальній осі натяжного барабана для запобігання утворенню заторів. Однак обґрунтованих значень висоти установки не доводилось. Тому бажаний ефект досягався не завжди, а значне завищення висоти призводило до невиправданого збільшення висоти бункера.

Встановлено, що в процесі заповнення ковшів шляхом зачерпування з насипу під дією відцентрових сил, відбувається викидання шару основного масиву матеріалу з ковша. Це дозволяє припустити, що причиною утворення затору є перетин потоку, що викидається з ковша, з потоком, що виходить з лотка. Таким чином, для виключення цього явища необхідно, щоб точка перетину вектору абсолютної швидкості викиданого потоку з ковша, перебувала нижче точки виходу потоку з лотка (рис. 1.17).

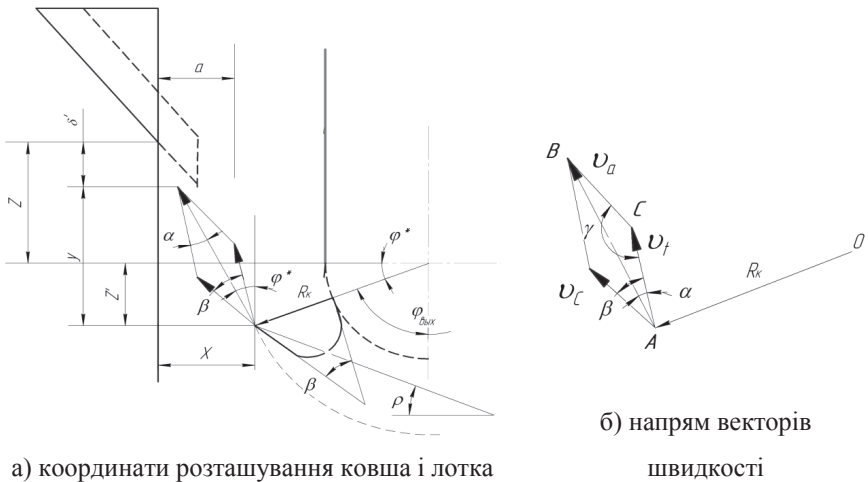


Рис. 1.17. Схема викиду матеріалу з ковша

Згідно з цією умовою:

$$Z^* = y - Z' + \delta', \quad (1.78)$$

де: y – координата точки перетину вектора абсолютної швидкості \mathcal{G}_a зі стінкою бункера;

Z' – відстань від точки виходу ковша з насипу до осі барабана;

δ' – необхідний запас висоти.

Відповідно:

$$y = x \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \phi^*),$$

$$x = (R_K + a) - R_K \cdot \cos \phi^*,$$

$$Z' = R_K \cdot \sin \phi^*,$$

$$\delta' = (0,25 \dots 0,3) h_B,$$

де: h_B – висота викинутого шару з ковша.

Значення кута α знаходимо з рішення трикутника ABC (рис. 1.17, б):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\mathcal{G}_C \cdot \sin \gamma}{\mathcal{G}_i - \mathcal{G}_C \cdot \cos \gamma}, \quad (1.79)$$

де: $\gamma' = \pi - \beta$; $\mathcal{G}_a = \sqrt{\mathcal{G}_i^2 + \mathcal{G}_C^2 + 2\mathcal{G}_i \cdot \mathcal{G}_C \cdot \cos \beta}$;

$\mathcal{G}_i = R_K \cdot \omega$ – окружна швидкість;

\mathcal{G}_C – швидкість ковзання шару, що витискається з ковша при зачерпуванні з насипу;

β – кут зачерпування ковша.

1.3.2.4. Аналіз розрахункових значень параметрів за отриманими залежностями

Для розрахунків у якості вихідних було використано данні, отримані у розділі 1.2.1.1, а також параметри конструкції норії продуктивністю 100 т/год.

Характеристика норії: швидкість стрічки – 2,4 м/с; поліуретанові ковші SPS 280-180HDP; кількість ковшів на 1 м довжини стрічки – 5; об'єм ковша за водним рівнем – 3,3 л; загальний об'єм – 4,2 л; ширина ковша – 290 мм; висота ковша – 185 мм; зазор між крайкою ковша і стінкою бункера – 60 мм, висота живлячого лотка – 596 мм; кут нахилу дна – 50°; висота установки лотка 111 мм; зазор $\Delta = 15$ мм.

У якості транспортуючого матеріалу обрано пшеницю з насипною масою -725 т/м³, з попередньо визначеним коефіцієнтом тертя кочення зерен – $f_k = 0,186$ і коефіцієнтом тертя по пластику $f_c = 0,22$.

Розрахунки фактично представляли собою чисельний аналіз досліджень, які супроводжувалися варіацією таких параметрів, як висота лотка, зазор між черпаючою крайкою ковша і стінкою бункера, місце розташування завантажувального люка, зазор між потоком і днищем верхнього ковша, швидкість потоку. Результати розрахунків наведено у табл. 1.5 та 1.6.

Результати розрахунків, за отриманими з аналізу процесу завантаження залежностям, дозволяють встановити оптимальні параметри заповнення ковшів. Фактично коефіцієнт заповнення відповідний необхідному рівню матеріалу в ковші відповідно до першої умови нормальної роботи норії.

Максимальна висота потоку при обраному кроці ковшів забезпечує його гарантоване потрапляння в ківш. Слід зазначити важливість встановлення значення наведеного коефіцієнта тертя f^* , який істотно впливає на швидкість потоку, а також дозволяє визначити кут нахилу труби, що відводить на голівці норії.

Розрахункові базові параметри заповнення ковшів

№№ п/п	Найменування	Позначення	Розмірність	Значення
1	Витрата живильного лотка	Q_L	л/с	34,7
2	Витрата норії	Q_H	л/с	39,6
3	Необхідний коефіцієнт заповнення	ψ_Z	-	0,876
4	Коефіцієнт збільшення висоти потоку	K_h	-	1,834
5	Приведений коефіцієнт тертя	f^*	-	0,333
6	Об'єм матеріалу витисне-ного з ковша при зачерпуванні з насипу	V_{KB}	л	2,149
7	Залишковий Об'єм матеріалу в ковші після зачерпування з насипу	$V_{ост}$	л	1,151
8	Швидкість ковзання шару в ковші при викиданні	$g_{Пmax}$	м/с	0,375

Результуючі параметри заповнення ковшів

№	Найменування	Позначення	Розмірність	Значення
1	Швидкість потоку	ϑ_{II}	м/с	2,87
2	Висота живлячого лотка	H	мм	604
3	Висота установки лотка	Z^*	мм	119
4	Параметр входу потоку	Δ	мм	37
5	Висота потоку	H	мм	41,7
6	Максимально можлива висота	h_{\max}	мм	76,5
7	Допустима висота при $\Delta=15$ мм	$[h_{\max}]$	мм	85,1
8	Час руху потоку після сходу з лотка	T	с	0,0765
9	Фактичний розрахунковий коефіцієнт заповнення	ψ_{Z3}	-	0,879
10	Об'єм потоку, що надходить в ківш	$V_{по}$	Л	1,741
11	Остаточний об'єм матеріалу в ковші після зачерпування з насипу	$V_{ост}$	Л	1,151

На рис. 1.18. наведено зміни параметрів заповнення ковшів в залежності від швидкості потоку. Зі зменшенням швидкості різко збільшується його номінальна і максимальна висота, що одночасно зі зменшенням об'єму досипання, може привести лише до часткового потрапляння в ківш, та до зменшення коефіцієнта заповнення.

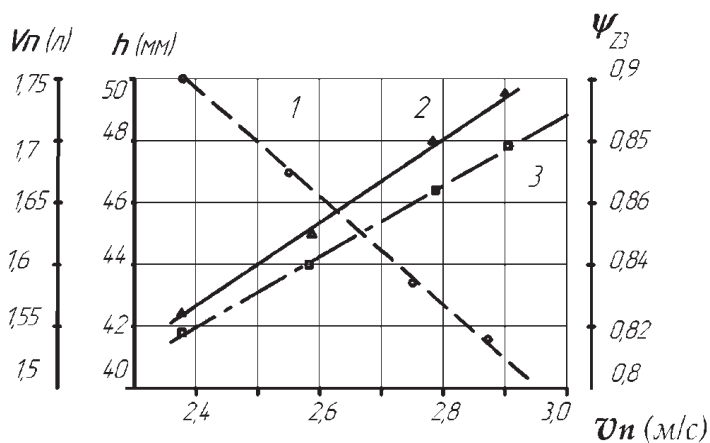


Рис. 1.18. Параметри заповнення ковшів при досипанні:

1 – висота потоку; 2 – об’єм досипаного матеріалу; 3 – коефіцієнт заповнення

На рис. 1.19 наведено значення максимальної висоти потоку, в результаті (внаслідок) утворюючої хвилі, і її допустимої висоти при різних прийнятих значеннях зазору Δ . Зі збільшенням швидкості потоку його максимальна висота зменшується, а гарантований зазор Δ буде зростати. Але при цьому заповнення ковша (відповідно до рис. 1.18) буде збільшуватися.

В процесі чисельного аналізу було встановлено істотний вплив зазору a між черпаючою крайкою ковша і стінкою бункера. Як правило, величину цього зазору встановлюють з умови торкання кромкою ковша стінки робочої труби норії, в результаті можливого поперечного коливання стрічки і забезпечення її стійкості, без узгодження цього з параметрами завантаження може виникнути як перевантаження, так і недовантаження ковшів. В табл. 1.7 наведені значення об’ємів заповнення і коефіцієнтів заповнення по водному рівню. Встановлено, що за інших рівних умов, стабільна робота норії і необхідний коефіцієнт заповнення забезпечується при зазорі $a = 60-62$ мм.

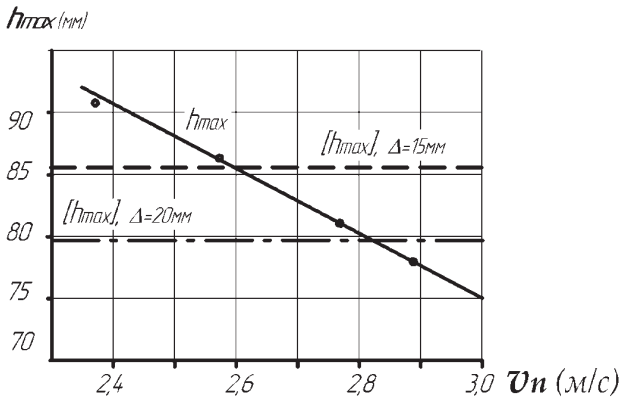


Рис. 1.19. Максимальна висота потоку h_{max} та його допустима величина $[h_{max}]$

Таблиця 1.7

Вплив зазору a на баланс об'ємів зачерпування і надходження в бункер

Зазор a , мм	Об'єм матеріала, л					
	$V_{по}$	V_K	$V_{пн}$	V_z	$V_{зач}$	ψ_{z3}
45	2,024	3,175	0,846	5,99	3,3	0,962
50	1,923	3,074	0,94	3,09	3,3	0,931
55	1,834	2,985	1,03	3,18	3,3	0,9
60	1,741	2,892	1,111	3,26	3,3	0,879
65	1,649	2,8	1,223	3,372	3,3	0,848

Останнім контрольним параметром є висота встановлення завантажувального лотка. Його розрахункова величина склала 119,6 мм, а у відомих конструкціях – 111 мм. Для норій продуктивністю до 100 т/ч висота установки лотка без обґрунтування рекомендується в межах 0,4...0,5 м, а для норій продуктивністю від 100 до 350 т/год – 0,5-0,57 м [46, 15]. Обидва показники явно завищені.

1.3.2.5. Ефективність заповнення ковшів при завантаженні по ходу тягового елемента

У більшості конструкцій норій, як вітчизняних, так і зарубіжних виробників живлячі лотки встановлюються з двох сторін, забезпечуючи завантаження норії, як по ходу, так і проти ходу. У літературних джерелах не вказується, з якою метою застосовується завантаження по ходу. Наводяться дані лише про те, що коефіцієнт заповнення ковшів менше, ніж при завантаженні по ходу, а отже і продуктивність норії при такому завантаженні буде менше. Рекомендується також встановлювати живильний лоток нижче горизонтальної осі направляючого барабана, хоча конкретних значень висоти установки не наводиться [15, 47].

Можна припустити, що заповнення ковшів по ходу пов'язано з необхідністю зменшення пошкоджень зерна, що має знижену міцність внаслідок різних причин.

Аналіз процесу зачерпування при завантаженні проти ходу і по ходу, показує, що динамічний вплив на зерно в другому випадку менше. Це обумовлено збігом напрямки руху вниз зернового потоку і ковшів, в той час як при завантаженні і відтворенні насипу проти ходу має місце зустрічний ударну дію.

Для виявлення причин травмування зерна розглянемо результати дослідження міцних властивостей зернових матеріалів, наведених в роботі [48] в якості основного об'єкта був обраний один з найбільш схильних до різних механічних операцій матеріал – пшениця. Як відомо, розрізняють три види пшениці: тверду, м'яку зі склоподібним ендоспермом і м'яку з борошнистим ендоспермом. Було встановлено, що міцність і здатність до руйнування залежить від поєднання вологості і скловидності зерна. При одній і тій же скловидності зі збільшенням вологості зерно володіє меншим модулем пружності, тобто меншою жорсткістю. У сухого зерна оболонка має великий модуль пружності, ніж у ендосперму. Внаслідок цього в тендітній оболонці навіть при малих

пружних деформаціях з'являються мікро тріщини, через які можуть проникати мікроорганізми і цвіль. При цьому збільшується поверхня зерна, знижує його міцність при повторних ударах в інших елементах норії.

Встановлено, що при вологості пшениці в межах 12,5-12,8% і нижче, зерно в цілому, особливо його скловидні сорти, з їх більш сухою оболонкою, являє собою досить крихке тіло, яке при динамічних навантаженнях руйнується при малій витраті енергії. При вологості 17-18% зерно являє собою пружно-пластичне тіло, в результаті чого робота руйнування зростає, а знову утворена поверхня за рахунок залишкової деформації зменшується, збільшуючи міцність зерна. Руйнування вологих зерен відбувається після великої залишкової деформації, тобто після внесення суттєвих змін до форми. Значення енергії руйнування і величини залишкових деформацій наведені в роботах [49–51], дозволяють визначити критичну швидкість до удару. Внаслідок малої жорсткості вологого зерна удар буде не пружним.

Все вищесказане дає можливість визначитися з вибором виду завантаження. Перш за все, необхідно встановити для якої подальшої технологічної операції здійснюється подача зернового матеріалу норією. Якщо транспортування здійснюється в млини для подрібнення, то завантаження сухого зерна можна виробляти проти ходу. Якщо зерно з тріщинами на оболонці, що характерно при порушенні режимів сушки, то краще завантаження вести по ходу, щоб не зменшувати якість зерна.

Особливу увагу необхідно приділяти контролю вологості. Всі зернові матеріали з вологістю менше 12,5% необхідно завантажувати в ковші по ходу. Пшениця з оптимальною вологістю 14,5% і вище може завантажуватися проти ходу. Зерно кукурудзи має більш пружну і крихку оболонку і м'який ендосперм, тому її схильність до травмування дуже велика. Навіть при оптимальній вологості кукурудзи 14% завантаження необхідно проводити по ходу. Крім того робота норії повинна відбуватися при швидкостях 0,7-1,2 м/с для сухого зерна ($W < 12\%$) та 1,2-2 м/с та для з вологістю 14% та вище. З метою зменшення

пошкоджень висота підйому норії не повинна перевищувати 30 м, для зменшення травмування при падінні вниз осипи і заповнення силосів для зберігання.

Найбільш складний вибір способу завантаження при транспортуванні зерна для зберігання. З досвіду експлуатації при вологості менше 14% можливо тривале і безпечне зберігання до 1 року, більше року – до 9% і нижче. Наведемо оптимальні показники вологості для деяких зернових культур: зернові 14-14,5%, соя – до 12,5%, сояшник – до 8%, арахіс – до 9%, інші масяні – до 12,5% (за даними інтернету). Що стосується зернових з малим опір зрушенню (коефіцієнтом внутрішнього тертя), це пшоно, горох, жито при вологості до 14%, то їх необхідно для зберігання завантажувати в ковші по ходу.

Всі продукти переробки зернових: комбікорми, сояшникове лущиння, а також інші відходи після обвалення, мінеральні добрива та інше подібне раціональне раціонально завантажувати проти ходу.

Для визначення коефіцієнта заповнення необхідно враховувати специфічні особливості процесу такого типу завантаження. Швидкість руху ковша буде набагато більше швидкості осипання насипу, утвореною надходженням з лотка. Захоплюючи частину потоку і занурюючись в насип, ківш швидко заповнюється до повного обсягу, а в нижній частині зустрічається з об'ємом матеріалу, витісненого з попередніх ковшів під дією відцентрових сил при підйомі вгору по дузі барабана, як це було показано в розділі 1.2. При цьому обсяг витісненого шару внаслідок опору буде менше, ніж витіснений об'єм при зачерпуванні з насипу, з протилежного боку, що утворюється подачею матеріалу проти ходу.

Визначити обсяг витісняється шару і залишковий обсяг в ковші при зачерпуванні по ходу надзвичайно складно. В цьому випадку можна використовувати дані з роботи [14] про можливе збільшення обсягів ковшів понад стандартних на 10%, а коефіцієнт заповнення визначати за залежністю:

$$\psi_{nx} = \psi_{z3}^* \cdot \frac{1,1 \cdot V_{z2}}{V_{z3}}, \quad (1.80)$$

де: ψ_{nx} – фактичний коефіцієнт заповнення по ходу;

ψ_{z3}^* – фактичний коефіцієнт заповнення ковшів з зустрічного насипу;

V_{z2} – стандартний повний обсяг ковша;

V_{z3} – об'єм по водному рівню.

По цій залежності ψ_{nx} більше, чим ψ_{z3}^* , але менше ψ_z – що визначається завантаженням проти ходу, що підтверджується практикою експлуатації.

1.3.2.6. Дослідження опору зачерпування під час пуску норії

Запуск норії зазвичай проводиться після завантаження бункера і утворення насипу, при цьому відбувається заповнення ковшів, занурених в насип. Запуск норії при порожньому бункері призведе до його тривалого заповнення і до тривалої роботи норії зі зниженою продуктивністю. У цьому випадку опір визначається режимом пуску і полягає в необхідності подолання сил інерції розгінних мас, що знаходяться між ковшами, і сил опору зрушенню цих же мас. Для визначення цих сил необхідно визначити кількість ковшів n , що знаходяться на дузі черпання з центральним кутом $\phi_{3ч}$, та масу транспортуємого матеріалу.

Загальний опір зачерпування в несталому режимі визначається залежністю:

$$F_{dS} = F_i + \sum_{k=1}^{n-1} F_{mk} + F_S, \quad (1.81)$$

де: F_i – інерційна складова опору зачерпування;

F_m – опір зсуву на поверхні руху маси матеріалу, що знаходиться між

ковшами k и $k+1$;

F_s – опор зсуву по боковим поверхням мас, що зсуваються.

Інерційна складова визначається, як:

$$F_i = m_n \cdot a_\tau,$$

де: m_n – маса, що зсувається та розміщена на дузі зачерпування, що визначається кутом $\phi_{зч}$;

a_τ – прискорення мас при пуску.

У відповідності до ствердження про (круглу) циліндричну поверхню зсуву, бокова поверхня зсунутих мас визначається площею кругового сегмента с центральним кутом $\phi_{зч}$:

$$S_{CM} = \frac{R_K^2}{2} \left(\frac{\phi_{CM} \cdot \pi}{180} - \sin \phi_{зч} \right). \quad (1.82)$$

Зрушувана маса при пуску буде рівна:

$$m_M = [A \cdot S_{CM} - V_{z2} \cdot (n-1)] \cdot \gamma, \quad (1.83)$$

де: A – ширина ковша;

V_{z2} – об'єм ковша по водному рівню;

γ – насипна маса матеріалу.

Тангенційне прискорення при пуску буде визначатися в режимі розгону ходової частини норії:

$$a_\tau \approx \frac{2R_K \cdot \phi_{зч}}{l^2}.$$

Як відомо, час пуску t асинхронного двигуна визначається як [33, 20, 52]:

$$t = \frac{J_{np} \cdot \omega_{\text{эд}}}{T_{cp.n} - T_C},$$

де: J_{np} – приведений момент інерції ходової частини норії:

$$J_{np} = K(J_p + J_M) + \frac{m_X \cdot D_B^2}{4 \cdot i_p^2 \cdot \eta_M} + \frac{2J_B}{i_p^2}, \quad (1.84)$$

де: $K = 1,15$ – коефіцієнт, що враховує обертання частини привода;

J_p – момент інерції ротора електродвигуна;

J_M – момент інерції муфти на валу електродвигуна (якщо J_M невідомий, то $K = 1,5$);

m_X – маса ходової гілки норії;

i_p – передатне число редуктора;

$J_B = m_{OB} \cdot R_B^2$ – момент інерції барабана;

$m_{OB} = 7,8 \cdot \pi \cdot D_B \cdot \delta \cdot B_B$ – маса барабана;

δ – товщина ободу барабана;

B_B – ширина барабана.

Середній пусковий момент електродвигуна визначається з виразу [52]:

$$T_{CP.П} = \frac{\Psi_{max} + \Psi_{min}}{2} \cdot T_{НОМ},$$

де: $\Psi_{max} = \frac{T_{max}}{T_{НОМ}}$ – максимальна кратність пускового моменту;

$\Psi_{min} = \frac{T_{min}}{T_{НОМ}}$ – мінімальна кратність пускового моменту.

Номінальний момент електродвигуна:

$$T_{НОМ} = 974 \frac{N_{\varepsilon\delta}}{n_{\varepsilon\delta}},$$

де: $N_{\varepsilon\delta}$ и $n_{\varepsilon\delta}$ – відповідно потужність та частота обертання двигуна.

Статичний момент на валу електродвигуна:

$$T_C = \frac{T_B}{i_P \cdot \eta_M},$$

де: $T_B = F_t \cdot D_B$ – момент на валу барабана;

$F_t = 1,1 \frac{Q \cdot H}{3,6 \cdot g_{\text{л}}}$ – окружне зусилля, що передається барабаном;

Q – продуктивність норії (т/ч);

H – висота норії; $g_{\text{л}}$ – швидкість стрічки.

Маса ходової частини норії складе:

$$m_X = (2q_X + q_T) \cdot H + \pi \cdot D_B \cdot q_T, \quad (1.85)$$

де: q_X и q_T – відповідно розподілені маси холостої та вантажної гілок норії.

Опір зсуву по поверхні насипу частини маси матеріалу, що знаходиться між ковшами і рухається з ними, визначиться як:

$$F_M = \tau \cdot A \cdot t_K,$$

де: $\tau = p \cdot \lambda$ – дотичне напруження на поверхні зсуву;

t_K – шаг ковшів;

λ – коефіцієнт зсуву;

A – ширина ковша.

Ущільнюючий тиск у кожній частині маси складе:

$$p = \frac{m_0 \cdot g}{A \cdot t_K} \sin(90 - \phi),$$

де: m_0 – маса матеріалу в проміжній частині;

ϕ – кут знаходження ковша, відрахований від вертикальної осі барабану.

Маса матеріалу в проміжній частині дорівнює:

$$m_0 = \frac{1}{n-1} [S_{CM} \cdot A - V_{Z2} \cdot (n-1)].$$

Таким чином, опір зсуву маси матеріалу, що знаходиться між ковшами, складе:

$$F_M = m_0 \cdot g \cdot \lambda \cdot \sin(90 - \phi). \quad (1.86)$$

Опір руху внаслідок тертя по боковим поверхням матеріалу і поверхням ковша можна прийняти по рекомендаціям для зачерпування ковшовими навантажувальними машинами, як:

$$F_S = 0,25 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} F_C. \quad (1.87)$$

В табл. 1.8 наведено параметри зачерпування при пуску для норії продуктивністю $Q = 100$ т/ч з наступними технічними характеристиками: $g_d = 2,4$ м/с, кількість ковшів типу SPS280-180HP на 1 м $n = 5$, погона маса вантажу $q_r = 113,7$ Н, електродвигун потужністю $N_{эд} = 18,5$ кВт, частота обертання $n_{эд} = 1470$ об/хв, момент інерції ротора $J_p = 0,127$ кГ·м², кратності

пускового моменту $\psi_{max} = 2,4$ и $\psi_{min} = 2,2$, передаточне число привода 24,52, діаметр барабана $D_B = 768$ мм, товщина стінки барабана $\delta = 5$ мм, матеріал – пшениця с насипною густиною 800 кг/м³.

Встановлено, що коефіцієнт зачерпування при пуску складає $K_{зач} = 2,416$, а загальний опір зачерпування – $F_{дс} = 279,6$ Н (табл. 1.8).

Таблиця 1.8

Параметри зачерпування при пуску

t_K	a_n	m_K	F_u	m_0	φ	T	F_C	$\sum F_C$	F_{TP}	$\frac{F_{зач}}{K_{зач} \cdot q_r} =$	q_r	$K_{зач}$
с	м/с ²	кг	Н	кг	град	Н/м ²	Н	Н	Н	Н	Н/м	-
0,54	6,529	171,6	4,05	0	464	26,98	8604	21,6	279,6	113,7	2,416	
				20	436	25,3						
				40	355,5	20,62						
				60	232	13,459						

1.3.3. Опір зачерпуванню при сталому режимі роботи

Для сталого режиму роботи норії розглянута наступна фізична модель утворення опору зачерпування. Згідно з нею опір зачерпування складається з: опору переміщенню призм з матеріалу, видавленого з ковшів, по поверхні каналу, прорізаного ковшами в насипу при роботі; опору сил зсуву по бокових поверхнях призм і опору при врізання ковшів в насип. Перші два види опору є постійними, і визначається сумою опору руху ковшів, які знаходяться на дузі їх переміщення в насипу (рис. 1.20). Третій вид опору є періодичним і носить ударний характер. Періодичність удару визначається часом повного заповнення ковшів в процесі зачерпування (рис. 1.21).

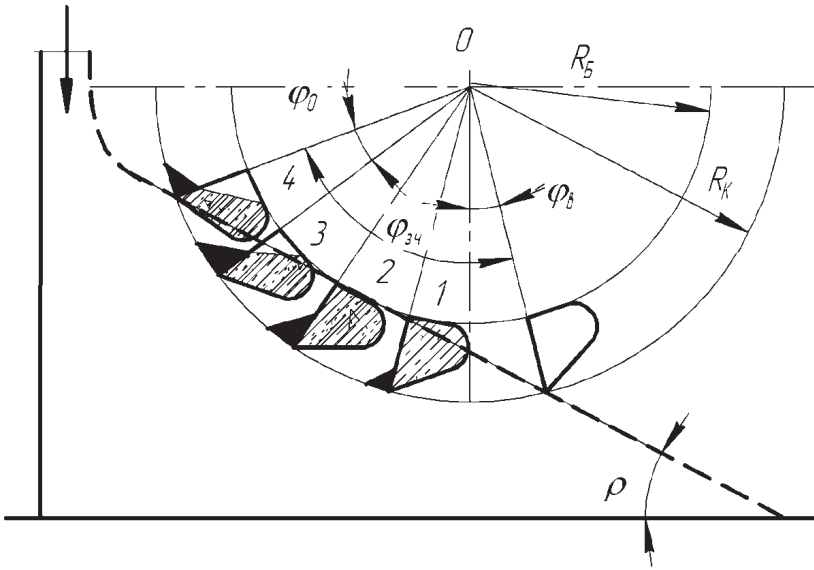


Рис. 1.20. Схема розміщення ковшів та призм на дузі зачерпування

Відповідно до прийнятої моделі опір зачерпуванні при сталому русі можна представити як:

$$F_{dp} = \sum_{k=1}^{n-1} F_C + F_S + F_b, \quad (1.88)$$

де: F_C – опір зсуву призми перед ковшем при заданому його положенні на дузі переміщення;

n – число ковшів на дузі зачерпування;

F_S – опір зсуву по боковим поверхням;

F_b – опір зачерпування внаслідок удару по дну ковша.

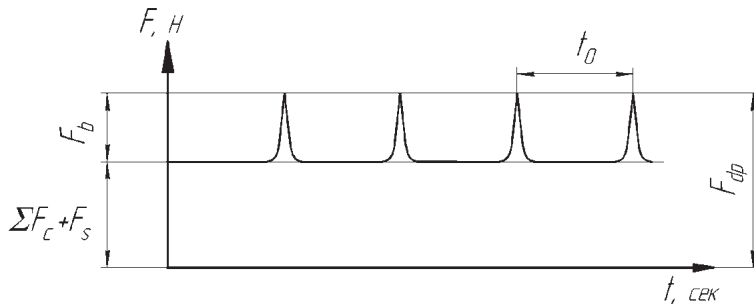


Рис. 1.21. Схема пульсацій опору зачерпуванню

На рис. 1.22 показані параметри утвореної призми витискання, що відповідає поточному куту повороту ковша на дузі зачерпування. Бокова поверхня призми уявляє собою прямокутний трикутник з одним криволінійним катетом. Висота призми в заданому положенні ковша буде визначатися висотою витісненого шару в попередньому положенні, збільшеної на висоту витісненого шару в поточному положенні. Шар буде зменшуватися, внаслідок збільшення обсягу призми і, відповідно, її поверхні. Зменшення висоти призми буде також обумовлено переходом до щільній структурі під дією стискаючих сил. У цьому випадку висоту призми в поточному положенні ковша можна визначити як:

$$h_c = \frac{1}{K_c} \cdot [h + h^* \cdot (V - V')], \quad (1.89)$$

- де: h – висота витісненого шару в попередньому положенні;
 h^* – висота шару, витісненого шару в заданому положенні;
 V – обсяг призми в заданому положенні;
 V' – обсяг призми в попередньому положенні;
 $K_c = \frac{1-n}{1-m}$ – коефіцієнт ущільнення;
 m і n – відповідно пористість пухкої та щільної структур.

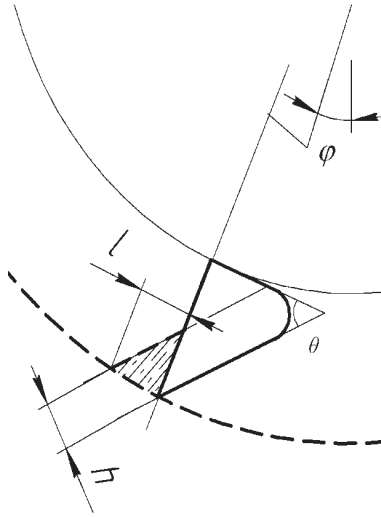


Рис. 1.22. Параметри призми витискання

При цьому маса призми складе:

$$m_p = V \cdot \gamma \cdot K_C.$$

Складова маси, що створює ущільнюючий тиск, буде рівна:

$$m_p' = m_p \cdot \sin(90 - \phi).$$

Відцентрова сила визначається як:

$$F_{ц} = m_p \cdot R_{ц} \cdot \omega^2. \quad (1.90)$$

Ущільнюючий тиск відповідно складе:

$$p = \frac{m_p' \cdot g + F_{ц}}{A \cdot l}.$$

Довжину основи призми визначено як:

$$l = \frac{2V \cdot \sin(90 - \theta)}{A \cdot h_c}, \quad (1.91)$$

де: θ – кут зачерпування ковша.

В результаті опір зрушенню призми дорівнюватиме:

$$F_c = \tau \cdot A \cdot l, \quad (1.92)$$

де: $\tau = p \cdot \lambda$ – дотичні напруження на поверхні зсуву.

Удар ковша при зачерпуванні буде суттєво відрізнятися від удару в'язко пружного тіла о перешкоду. В роботі [19] відмічено, що ударна дія потоку дискретних часток по перешкоді залежить від форми часток та їх взаємодії в структурі потоку. В нашому випадку ударна дія ковша при зачерпуванні буде супроводжуватися переходом від рихлої структури до щільної, опір зсуву часток і збільшення щільності зачерпуваної маси.

Ударний імпульс визначаємо, як:

$$N_b = m \cdot g_{II} \cdot (1 + K).$$

При зачерпуванні зернової маси удар буде абсолютно не пружним ($K=0$) зі зміною маси внаслідок миттєвого ущільнення.

В цьому випадку зачерпувана маса визначиться, як:

$$m_b = V_{z2} \cdot \gamma \cdot K_c, \quad (1.93)$$

де: V_{z2} – повний обсяг ковша по міжнародним стандартам.

Сила удару буде дорівнювати:

$$F_b = \frac{m_b \cdot g_{II}}{t_b \cdot \lambda}, \quad (1.94)$$

де: $t_b = \frac{\varphi_B^0 \cdot 3.14}{180 \cdot \omega}$ – час удару;

φ_B – кут повороту при заповненні ковша (рис. 1.20);

ω – кутова швидкість.

В табл. 1.9 наведено параметри зачерпування при сталому режимі роботи норії, з технічною характеристикою, що розглянуто вище. Визначено коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії $K_{3АЧ} = 1,748$; опір зачерпування $F_{dp} = 202,2$ Н.

Таблиця 1.9

Параметри зачерпування при сталому режимі

Φ	h_C	m_P	T	F_C	θ	$\sum F_C$	t_b	F_b	F_S	F_{dp}	$K_{3АЧ}$
Град	Мм	кг		Н	град	Н	Сек	Н	Н	Н	-
20	42,7	0,42	463,4	8,6	40	54,13	0,057	134,27	13,6	202,2	1,748
40	48,35	1,05	761,6	19,66							
60	63,73	1,487	902,6	26,13							

1.3.4. Опір зачерпування по ходу тягового органу

Процес зачерпування по ходу істотно відрізняється від процесу зачерпування при завантаженні проти ходу. При заповненні бункера по ходу в його правій половині утворюється насип з кутом укосу ρ . Після пуску норії, матеріал, що зачерпується, перекидається в ліву половину бункера, де поступово утворюється така ж насип.

При сталому русі ківш, переходячи на криволінійну ділянку руху, захопить частину потоку з завантажувального лотка. Частина потоку, що залишилася, буде

надходити вниз, поповнюючи рівень насипу. В процесі подальшого руху по прорізаному та «підтримуємо» попередніми ковшами каналу ківш буде поповнюватися зрушеною вниз частиною захопленого потоку і частково із насипу, що осипається. Повне заповнення ковша відбудеться в нижній частині каналу, куди буде обсипатися частина насипу з протилежного боку. Зачерпування відбудеться без удару, так як він буде погашений подушкою матеріалу, що знаходиться в ковші. Таким чином, опір зачерпуванню буде менше, ніж опір зачерпуванню при завантаженні проти ходу.

Розрахунок опору зсуву призм, що утворюються внаслідок видавлювання шару з ковша під дією відцентрової сили при русі вгору по каналу, необхідно вести виходячи з повного обсягу ковша V_{z2} . Для реалізації такої моделі, завантажувальний лоток необхідно встановлювати так, щоб нижня кромка днища була нижче горизонтальної осі барабана на величину:

$$\Delta \approx 1,5h / \cos \rho, \quad (1.95)$$

де: h – висота потоку, що надходить з завантажувального лотка.

Порівняльний аналіз і оцінка отриманих результатів показує, що розрахункові значення коефіцієнтів зачерпування, отримані за приведеними залежностями, мають той же порядок, що і їх значення, наявні в довідковій літературі. Це свідчить про те, що представляється можливим отримувати уточнені дані для кожного конкретного сипучого матеріалу на відміну від відомих даних, що мають однакові значення для приблизно однакових матеріалів, та ще для діапазону малих швидкостей.

З наведених залежностей випливає, що збільшення коефіцієнтів зачерпування при збільшенні швидкостей руху носить нелінійний зростаючий характер. Це підтверджується результатами роботи [53], метою якої було встановити можливість застосування високих швидкостей (2,3-6,2) м/с для збільшення продуктивності норій. Було виявлено, що при швидкостях понад

5 м/с, різко зростала питома потужність приводу. Пульсуюча ударна складова опору зачерпування є основною причиною виникнення поздовжніх і поперечних коливань стрічки, процес яких досліджено у роботі [54].

Висновки до розділу 1.3

1. Визначено залежності, що дозволяють визначати коефіцієнт заповнень ковшів при зачерпуванні з насипу та при їх завантаженні проти ходу і по ходу тягового елемента.

2. Встановлено, що низьке значення коефіцієнта заповнення ковшів, при зачерпуванні з насипу, є наслідок витіснення шару зерна, під дією відцентрової сили, що виникає при обертанні ковшів у вертикальній площині, щодо центру обертання.

3. Для отримання оптимальних значень коефіцієнтів заповнення ковшів необхідно погоджувати швидкість досипаючого потоку з лотка зі швидкістю тягового елемента.

4. З'ясовано умови попадання досипаючого потоку в ківш і залежність кроку ковшів від його максимальної висоти.

5. Визначено причини утворення затору в літаючому лотку і кінематичні - конструктивні параметри завантаження, що виключає цю можливість.

6. Складено фізичні моделі процесів зачерпування при різних режимах роботи норії.

7. Отримано аналітичні залежності для визначення складових опор зачерпування і коефіцієнтів зачерпування в залежності від специфічних фізико-механічних властивостей сипучих матеріалів і швидкості руху ковшів.

8. Порівняльний аналіз отриманих значень коефіцієнтів зачерпування з орієнтовними даними, наведеними в довідковій літературі, вказує на можливість отримання уточнених даних для кожного конкретного сипучого матеріалу і заданої швидкості руху ковшів.

1.4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТОСТІ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ОПОРУ ЗСУВУ ТА ПАРАМЕТРІВ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ ПРИ ДОСИПАННІ З ЛОТКА

В результаті аналітичного дослідження процесів заповнення ковшів було отримано залежності для визначення конструктивно-кінематичних параметрів, які визначають ефективність роботи норій. Ці залежності містять цілий ряд показників фізико-механічних властивостей зернових матеріалів таких як: коефіцієнт опору зсуву, коефіцієнти тертя на опорних площинах з різних матеріалів, пористість рихлої і щільної структур, об'єми та маса зернівок, кути природного відкосу. Деякі з цих показників для обмеженого числа зернових матеріалів наведено у довідковій літературі у вигляді окремих значень або діапазонів їх можливих граничних змін. При цьому не вказано яким чином та при якій вологості матеріалу вони були отримані. Ці данні не дозволяють визначитися з можливими змінами продуктивності при розрахунках як спеціальних, так і універсальних норій. Деякі залежності отримані на основі гіпотез та допущень, та потребують експериментального підтвердження або підтвердження. Особливу цікавість уявляє експериментальне дослідження процесу лавиноподібного витікання зернового матеріалу по поверхні живлячого лотка, який головним чином і визначає заповнення ковшів при завантаженні норій проти хода робочого елемента, а такий спосіб завантаження у більшості випадків являється основним [55, 28].

У зв'язку з вище сказаним, було прийнято два напрямки експериментальних досліджень:

- 1) визначення перелічених фізико-механічних характеристик зернових матеріалів у залежності від вологості;
- 2) визначення параметрів витікання лавиноподібного потоку в залежності від розмірів живлячого лотка та способів подачі в нього зернового матеріалу.

Дослідження було проведено на базі кафедри «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв» Державного біотехнологічного університету (м. Харків).

1.4.1. Дослідження фізико-механічних властивостей зернових матеріалів

В перш необхідно визначити значення пористості пухкої і щільною структур для різних зернових культур і їх залежність від вологості. Ці значення можуть суттєво відрізнятись від відповідних значень при укладанні куль і інших заокруглених і мають однакові розміри тіл.

Значення пористості для пухкої і щільною структур визначаємо за відомими залежностями, відповідно:

$$\begin{aligned} m &= 1 - \frac{q_{px}}{q}; \\ n &= 1 - \frac{q_{nl}}{q}, \end{aligned} \tag{1.96}$$

де: q_{px} і q_{nl} – відповідно, питомі маси пухкої і щільною структур, г/см³;
 q – дійсна густина суцільного зернового матеріалу, без зазорів і пір, г/см³.

Значення q_{px} і q_{nl} також є важливими фізичними показниками, так як дозволяють визначити об'ємну масу зернового матеріалу і відповідно силу нормального тиску при отриманні значень коефіцієнтів тертя і зсуву сипучих матеріалів в процесі зсуву зернового шару в структурі, а також при його русі по опорним площинах різних пристроїв.

Визначення об'ємних мас пухкої і щільною структур проводилося за наступною методики:

1) утворення структур проводилося в скляній циліндричній мірній колбі об'ємом 200 мл. Значення q_{px} і q_{nl} отримували шляхом зважування пустот колби

і колби, заповненої матеріалом заданої структури до позначки 150 мл. Зважування проводилося на ювелірних вагах з межею вимірювання 500 г з точністю до 0,01 г. Утворення пухкої і щільної структур проводилося наступним чином. Пухка структура створювалася відповідно до рекомендацій, що наведені у роботі [56] шляхом засипання матеріалу вздовж похилої стінки колби з подальшим плавним поворотом колби у вертикальне положення. Цим виключалося динамічний тиск і ущільнення при засипці. Освіта щільної структури проводилося шляхом пошарової вертикальної засипки (по 30 мл) з наступними п'ятикратними коливаннями в горизонтальній площині в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Потім кожен шар ущільнювався спеціальною п'ятою з обертанням. Оптична перевірка показувала, що зерна стикаються і розташовуються в одній площині, що відповідає щільній структурі упаковки;

2) дійсну густину зерна прийняли q_z , як відношення маси одного зерна до його об'єму (г/см^3), масу одного зерна встановлювали зважуванням 10 проб по 100 зерен в кожній відібраній пробі, з обчисленням середньої арифметичної величини з подальшим приведенням до обсягу 150 мл. Обсяг одного зерна встановлювався наступним чином. Для зерен з об'ємною масою більше об'ємної маси води (потопаючих) обсяг визначався за різницею об'ємів води 150 мл після засипки в колбу 100 зерен матеріалу. Різниця обсягів визначалася за допомогою відбору води до рівня 150 мл за допомогою інсулінового шприца з голкою об'ємом 1 мл і з ціною поділки 0,02 мл. Результат значення обсягу визначався як середня арифметична величина при випробуванні 12 проб. Обсяг зерен з об'ємною масою менше об'ємної маси води (непотопаючий) визначався шляхом вимірювання об'єму відбитка в пластиліні, заповнені водою. Дослідження проводилося на 25 відбитках з 15 проб.

Доведення зерна до певної вологості (12,5–20%) виробляли за методикою, перевіреної в роботі [57]. Зерно, при його зволоженні методом додавання розрахункової кількості води, поміщали в літрову банку. Кількість води, що

додається до зерна G_B , мл, розраховувалося за формулою:

$$G_B = m_H \frac{w_K - w_H}{100 - w_H}, \quad (1.97)$$

де m_H – маса вихідної навішування, г;

w_H – вологість зерна в навішуванні до зволоження, %;

w_K – необхідна вологість, %.

Після додавання води, банку герметично закриваємо і витримуємо зерно протягом 24 годин, періодично перевертаємо і струшуємо. Для визначення фактичної вологості зерна до і після зволоження використовували електронний вимірювач вологості WILE-55 (рис. 1.23) з числом вимірюваних культур рівним 16. Середня арифметична величина вологості визначалася шляхом вимірюванням 7 проб, які розміщені в чашу приладу.



Рис. 1.23. Електронний вимірювач вологості WILE-55

Результати досліджень наведені в табл. 1.10 для насіння соняшнику і пшениці. Характер зміни пористості пухкої і щільною структур в залежності від

вологості наведено на (рис. 1.24). Залежності мають лінійний характер, тому проміжні значення можна визначити шляхом лінійної інтерполяції.

Щоб підтвердити правильність застосованих методів дослідження і достовірність результатів, були проведені додаткові дослідження з визначення об'ємних мас пухких і щільних структур при інших умовах випробувань.

Таблиця 1.10

Залежність параметрів пористості від вологості

Матеріал	W, %	8,2	13,6	17,6	22
Соняшник	q_3 , г/см ³	0,985	0,986	0,989	0,992
	q_{px} , г/см ³	0,317	0,344	0,356	0,353
	$q_{пл}$, г/см ³	0,393	0,398	0,4	0,399
	m	0,66	0,651	0,647	0,644
	n	0,6	0,596	0,599	0,596
Матеріал	W, %	9,7	14,8	17,4	20,5
Пшениця	q_3 , г/см ³	1,33	1,29	1,278	1,262
	q_{px} , г/см ³	0,755	0,691	0,66	0,615
	$q_{пл}$, г/см ³	0,806	0,795	0,78	0,73
	m	0,435	0,464	0,483	0,513
	n	0,338	0,338	0,390	0,422

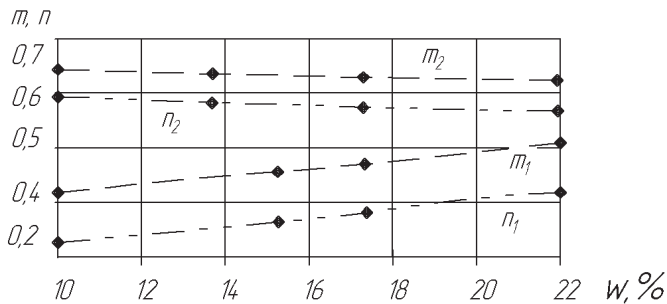


Рис. 1.24. Залежність пористості шару зерна від вологості:

m_1 та n_1 – відповідно пористість пухкої і щільної структури пшениці;

m_2 та n_2 – відповідно пористість пухкої і щільної структури соняшнику

Всупереч загальноприйнятій думці, було встановлено, що значення об'ємних мас пухких і щільних структур не залежать від форми і розмірів застосовуваних судин, при однакових умовах їх утворення.

Так, наприклад, при визначенні об'ємної маси пухкої структури q_{px} в зазначеній раніше скляній мірній колбі висотою 130 мм, діаметром 48 мм і масою 65 г, рівень насипати пшениці вологістю $W = 8\%$ до обсягу 150 см^3 , склав 84 мм. При цьому $q_{px} = 0,8 \text{ г/см}^3$.

Такі ж вимірювання, проведені в квадратному пластиковому лотку з розмірами сторін 120 мм і висотою 50 мм, маса лотка 62,4 г. Обсяг засипаного матеріалу дорівнював 300 см^3 , при цьому висота матеріалу в лотку склала 32,5 мм. Значення об'ємної пухкої маси було визначено рівним $q_{px} = 0,821 \text{ г/см}^3$. Різниця залежала лише від точності зважування. Таким чином, при визначенні обсягу маси пухкої структури повинні бути виконані наступні умови. Висота насипного матеріалу повинна бути не менше 0,65 (приблизно 2/3) від висоти посудини, насипання має бути природним, без струшувань і ущільнення матеріалу, з його рівномірним розподілом по площі. Висота насипання не впливає на результат.

При проектуванні норій дуже важливо знати, яка структура утворюється при тій чи іншій операції заповнення ковшів. Від цього буде залежати розрахункова кількість ковшів і обсяг матеріалу в ковші, що і визначає реальну продуктивність норії. Як відомо з практики реальна продуктивність норій, в більшості випадків, становить 75–80% від розрахункової. Так, наприклад, визначення параметрів норії для транспортування товарної пшениці вологістю $W = 15\%$ багатьма виробниками (4B BELIME Elevator Components limited та ін.) Розрахункова маса приймається $q_{px} = 750 \text{ кг/м}^3$, що відповідає середньому значенню отриманих теоретично $q_{px} = 691 \text{ кг/м}^3$ та $q_{пл} = 800 \text{ кг/м}^3$. Карлівський машзавод дає дані про те, що норії для транспортування гранул соняшникового лушпиння реальна продуктивність складає 70 т/ч при необхідній (розрахунковій)

100 т/ч. Датська фірма «Монсун» для норій, що транспортують ячмінь визначає параметри, беручи значення об'ємної маси 700 кг/м^3 . За Г. Клейном вона знаходиться в межах $430\text{--}750 \text{ кг/м}^3$, а отримані нами дані для ячменю вологістю $W = 15\% \text{ } q_{\text{рх}} = 520 \text{ кг/м}^3$ та $q_{\text{пл}} = 650 \text{ кг/м}^3$.

Таким чином, отримані результати, свідчать про те, що застосовувані в роботі методики, дозволяють отримати адекватні параметри пористості і об'ємних мас сипучих матеріалів.

Отримані експериментальні дані по визначенню об'ємів зерен дозволили визначити їх просторову стереометричну форму і встановити розрахункові залежності, що визначають отримання значень об'ємів за реальними розмірами зерен, наведених в табл. 1.1.

При теоретичному вирішенні задач механіки сипких тіл, пов'язаних з дослідженням процесів зберігання, дозування, транспортування і закінчення зернових матеріалів і інших сипучих тіл, всі частки представляються у вигляді кулі з умовним діаметром, що визначається за формулою проф. Л.В. Гячева [58]:

$$d_y = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}, \quad (1.98)$$

де: a, b, c – довжина (висота), ширина і товщина реальної частки.

Однак, як було показано в розділі 1.2, форма реальної частки зернових матеріалів істотно впливає на величину кутової деформації і опору зсуву. Це підтверджується і практикою що форма реальної частки має суттєвий значення на перебіг зазначених процесів, а також на конструктивні і технологічні параметри пристроїв, що реалізують ці процеси.

В роботі [59] пропонують уточнювати значення умовного діаметра в залежності від конкретних форм частинок наступними співвідношеннями:

а) для частинок у формі прямого конуса:

$$\frac{d_y}{\sqrt{d_K^2 + a}} = 0,8, \quad (1.99)$$

де d_K – діаметр основи конуса;

б) для частинок у вигляді правильної піраміди:

$$\frac{d_y}{\sqrt[3]{S \cdot a}} = 0.86, \quad (1.100)$$

де S – площа основи піраміди;

в) для частинок у вигляді просторового клина:

$$\frac{d_y}{\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}} = 0.96, \quad (1.101)$$

г) для частинок у вигляді параболічної бочки:

$$\frac{d_y}{\sqrt[3]{(0.8 \cdot b^2 + 4b \cdot c + 3c^2)}} = 0.47. \quad (1.102)$$

Однак і ці залежності дають наближені значення, так як не враховують реальну форму підстави зерна. Як показують результати наших експериментів і деякі відомі з практики дані, обсяги частинок виходять завищеними, а справжня об'ємна маса зерна – занижена.

Тому нами запропоновано залежності, засновані на реальних середніх розмірах, отриманих на практиці (табл. 1.1) і підтверджені оптичними дослідженнями форми зерен. Так відповідно до цього:

а) зерна пшениці, жита, ячменю та вівса не мають форму параболічної бочки, а є еліпсоїдом, які мають гострі краї і канавки по ширині b (рис. 1.25).

Розрахунковий обсяг еліпсоїда в цьому випадку складе:

$$V = \frac{4}{3} \pi [(a_{cp} - 2\Delta_1) \cdot b \cdot c], \text{ мм}^3, \quad (1.103)$$

де: $\Delta_1 = 0,8; 0,6; 0,5; 1,2$ – відповідно для пшениці, жита, ячменю та вівса;

$b = \frac{b_{cp}}{2}$ та $c = \frac{c_p}{2}$ – напівосі;

б) соняшник. Форма насіння являє собою піраміду з округленими гранями і з перемінним перетином у вигляді ромба, які збільшуються від заснування до

2/3 висоти, з подальшим зменшенням до нуля (рис. 1.26). Обсяг такої піраміди згідно з даними експерименту можна представити у вигляді:

$$V = \frac{1}{2,2} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3 \quad (1.104)$$

де $S = \frac{1}{2} \cdot b_{\max} \cdot c_{\max}$, b_{\max} і c_{\max} – діагоналі ромба, максимальна ширина і

товщина у відповідність з даними табл. 1.1

в) кукурудза. Формою кукурудзи є піраміда з основою у вигляді овалу (рис. 1.27). Обсяг піраміди складе:

$$V = \frac{1}{3} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3, \quad (1.105)$$

де: $S = \pi \cdot b \cdot c$, $b = \frac{b_{cp}}{2}$ та $c = \frac{c_p}{2}$ – напівосі.

г) гречка є піраміду з основою у вигляді витягнутого ромба (рис. 1.28), у якого одна діагональ значно більша за іншу:

$$V = \frac{1}{3} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3, \quad (1.106)$$

де: $S = \frac{1}{2} \cdot b_{cp} \cdot c_{cp}$, b_{cp} і c_p – діагоналі основи

д) горох, соя, просо мають кулясту форму з об'ємом:

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{cp}^3, \text{ мм}^3, \quad (1.107)$$

де: $d_{cp} = \frac{1}{3}(a_{cp} + b_{cp} + c_{cp})$.

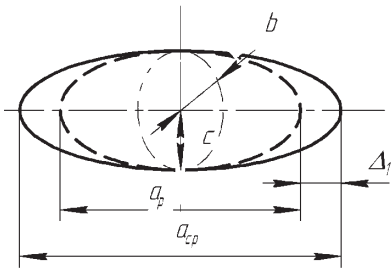


Рис. 1.25. Форма зернини зернової культури

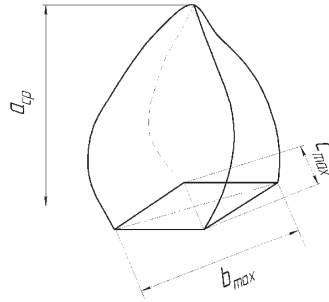


Рис. 1.26. Форма насіння соняшника

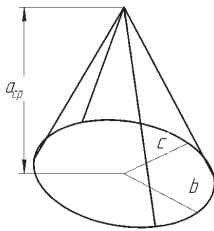


Рис. 1.27. Форма зернини кукурудзи

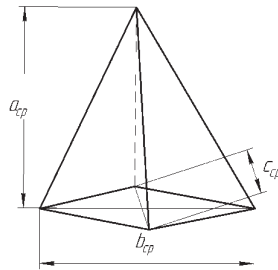


Рис. 1.28. Форма зернини гречки

У розділі 1.2 була отримано залежність, згідно до якої стає можливим визначати коефіцієнти зсуву за значеннями кута укосу і відносної деформації зернового матеріалу. Ця залежність вимагає експериментального підтвердження для конкретних видів зернових. Крім того, представляє інтерес з'ясувати і порівняти значення коефіцієнта зсуву і можливість їх застосування при різних видах укосу.

Кут природного укосу, можливо, визначити трьома способами: при утворенні укосу шляхом насипання матеріалу на опорну поверхню, осипанням укосу за допомогою утворення циліндра і в ящику Кулона з підйомної стінкою. У перших двох випадках утворюється осесиметричний укіс у вигляді конуса. В ящику Кулона при підйомі стінки відбувається обвалення сипучого матеріалу з

утворенням несиметричного укосу. У всіх трьох випадках кут природного укосу має різні значення. За результатами численних досліджень відомо, що кут природного укосу при насипання менше кута укосу, отриманого в ящику Кулона. Г.К. Клейн вважає, що це пояснюється різної рухливістю часток, яка залежить від розподілу тиску на схилі. В роботах [60,61,21] на підставі дослідів прийшли до висновку, що кут природного укосу дорівнює куту внутрішнього тертя, лише для шарів, що лежать дуже близько до котра утворює поверхні. Для шарів, що лежать в глибині, кут природного укосу менше кута внутрішнього тертя, так як частинки знаходяться під великим тиском – при цьому стає незрозумілим, який же кут визначає опір зрушенню. Е. Дженіке вважає, що сипучі матеріали з різними розмірами частинок при насипання утворюють укіс, у якого в верхній частині кут природного укосу, більше ніж в основі. Це відбувається тому, що при падінні на поверхню з деякої висоти малі частки сприймаю удари більш великих часток і відтісняються до центральної осі, ущільнюючи у верхній частині, в той час як великі частки спускаються вниз і розташовуються в кутовій частині підстави конуса (рис. 1.29). При цьому кут природного укосу може коливатися в межах 10° , і тому показником для опору зрушенню і витіканню сипкого матеріалу бути не може.

Форма вісесиметричного укосу із застосуванням утворенням циліндру встановлюється шляхом обвалення. Значення кутів укосу при цьому, як і опір зрушенню, не відомі до теперішнього часу. Для практичних розрахунків важливо знати, за якими кутах укосу необхідно визначати опір зрушенню, і наскільки певні по ним коефіцієнти зсуву, збігаються з коефіцієнтами зсуву, що отримується за методикою Е. Дженіке.

Першим завданням дослідження вісесиметричного укосу є встановлення впливу матеріалу і розмірів, висоти і внутрішнього діаметра, на параметри одержуваних зразків. У процесі вирішення цього завдання використовувалися сталеві, картонні і пластикові циліндри, висотою від 100 до 230 мм і діаметром від 28 до 60 мм. Попередні випробування показали, що матеріал циліндрів не

впливає на параметри укосу. Тому випробування проводилися з трьома типами пластикових поліуретанових циліндрів: циліндр № 1 мав висоту 100 мм і внутрішній діаметр 45 мм, циліндр № 2 – відповідно 150 мм і 48 мм; циліндр № 3 – відповідно 210 і 28 мм. Результати випробувань показали, що на відміну від форми укосів одержуваних насипання (рис. 1.29, а), зернові матеріали навіть при великій вологості (близько $W = 22\%$) утворюють укоси у вигляді усіченого конуса з різною формою у верхній і нижній частині (рис. 1.29, б, в, г).

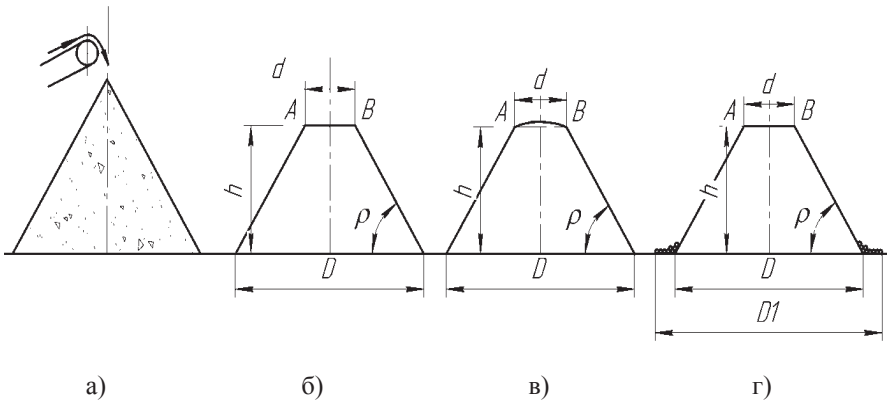


Рис. 1.29. Форми віесиметричних укосів:
а – при насипання; б, в, г – при обваленні

Зернові матеріали з кулястою формою частинок відсипаються, утворюючи в нижній частині конусу шар з одинарних зерен, не впливаючи на кут укосу (рис. 1.29, г), тому діаметр D_1 в розрахунок не береться. Таким чином, кут природного укосу визначається по залежності:

$$\operatorname{tg} \rho = \frac{2h}{D-d}. \quad (1.108)$$

Другим завданням дослідження вісесиметричного укосу, одержаного за допомогою циліндра є встановити вплив матеріалу опорної поверхні. Г. Клейн висловлює думку, що при насипному укосі його форма залежить від стану поверхні, головним чином від шорсткості і ступеня адгезії. У нашому випадку становлять інтерес пластикові поверхні і поверхні гладких сталей, які є основними поверхнями робочих елементів норій.

У табл. 1.11 наведені параметри укосів, отриманих застосуванням трьох типів циліндрів (№ 1, 2, 3) на різних опорних поверхнях. Дані свідчать про те, що розміри циліндрів і тип матеріалів опорних поверхонь істотно не впливають на параметри укосів і відповідні коефіцієнти опору зрушенню.

Таблиця 1.11

Параметри вісесиметричного природного укосу на різних опорних площинах при різних розмірах твірного циліндра

Матеріал	№ цил.	D	d_1	H	$Tg\rho$	P	A
		Мм	Мм	Мм		Град	
Пластик, поліуретан	1	117	25	23,5	0,51	27°6'	0,615
	2	145	32	29	0,513	27°12'	0,619
	3	118	21	25	0,515	27°24'	0,623
Гладка сталь	1	118	23	24,5	0,515	27°24'	0,623
	2	142	30,5	29	0,517	27°18'	0,625
	3	121	24,5	24,8	0,515	27°12'	0,624
Скло-пластик	1	122	24,5	25	0,513	27°12'	0,619
	2	152	22,5	32,5	0,501	27°	0,612
	3	126	24	26	0,51	27°6'	0,610

В табл. 1.12 та рис. 1.30 наведені значення коефіцієнтів опору зсуву для різних зернових матеріалів в залежності від вологості, визначених по кутах внутрішнього тертя осесиметричних укосів отриманих на поверхні з поліуретану.

Відомо, що опір зрушенню залежить від щільності структури сипкого матеріалу. Наведені на рис. 1.30 залежності, отримані по кутах вісесиметричного

укося при заповненні утворюючого циліндра зерном без ущільнення. У табл. 1.13 та 1.14 приведені величини коефіцієнтів опору зсуву, отримані при заповненні циліндра з ущільненням (згідно з раніше застосовуваної методикою – λ^*) і без ущільнення – λ . Згідно з цими даними, ущільнення матеріалу в циліндрі не призводить до збільшення кута укося, параметри укося змінюються, але кут укося не змінюється, а, отже, і коефіцієнт опору зрушенню, визначеного таким чином. Це є найважливішою перевагою такого способу.

Таблиця 1.12

Залежність параметрів опору зрушенню від вологості культури

Пше- ниця $Y=0,5$ 2	W	9,7	14,8	17,4	20,4	Ку- курудза $Y=0,58$	W	9,4	13,8	16,6	20,4
	A	0,61 1	0,69 6	0,72 8	0,77 8		λ	0,71 8	0,80 7	0,88 7	0,98 5
	F	0,53 2	0,61 2	0,64 9	0,67		f	0,68 7	0,74 8	0,80 9	0,85 7
	M	0,09 1	0,17	0,20 5	0,25 6		μ	0,13 8	0,22 7	0,30 7	0,40 5
Со- няшник $Y=0,45$	W	8,2	13,6	17,4	22	Просо $Y=0,49$ 2	W	8,4	15,1	16,8	20,1
	A	0,68 4	0,77 8	0,83	0,94 4		λ	0,51 9	0,56 1	0,61 3	0,64 5
	F	0,54 3	0,6	0,62 9	0,69 7		f	0,46	0,49 4	0,52 3	0,55 4
	M	0,23 7	0,32 3	0,38	0,49 4		μ	0,02 7	0,07	0,12 1	0,15 3

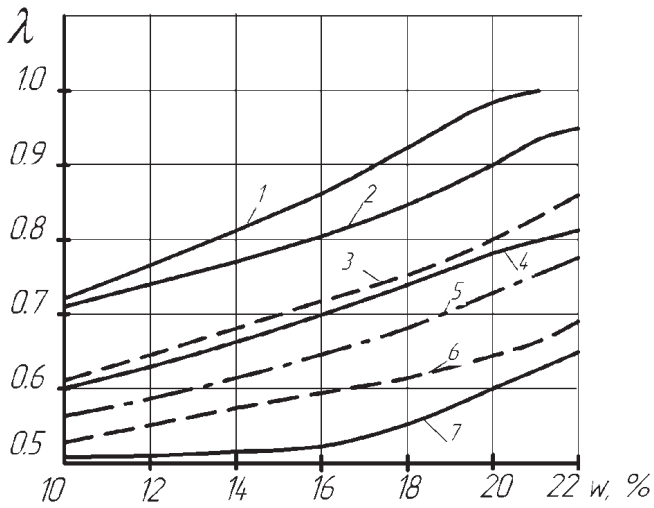


Рис. 1.30. Залежність коефіцієнта опору зрушенню від вологості культури:

1 – кукурудза; 2 – соняшник; 3 – гречка; 4 – пшениця; 5 – соя; 6 – просо;

7 – горох

Таблиця 1.13

Значення параметрів укусу і коефіцієнта зсуву від щільності укладання матеріалу в циліндрі

Матеріал	Стан	D	d_l	h	P	A
		Мм	Мм	мм	Град	
Кукурудза $W=11,4\%$ $\gamma=0,58$	Пухкий	104	31	26	$35^\circ 12'$	0,752
	Щільний	98	21	28.5	$35^\circ 48'$	0,766

Таблиця 1.14

Коефіцієнти опору зрушенню в залежності від ущільнення

Матеріал	W	D	d_1	H	ρ	λ^*	A
Пшениця	10,4%	110	18	26,5	29°	0,625	0,615
Кукурудза	11,4%	98	18	26,5	35°30'	0,754	0,76

Порівняємо отримані результати з деякими відомими даними, отриманими для несиметричних укосів в ящику Кулона, що приведені у роботах (табл. 1.15) [162,63]. Для порівняльного аналізу обрані параметри укосів для сухих зернових матеріалів ($W = 9,7-10\%$) у яких показники більш стабільні.

Таблиця 1.15

Параметри укосів для різних культур

Матеріал	Параметри	Г. К. Клейн	В. В. Красніков	Осесиметричний укос
Соняшник $Y = 0,45$	P	33°	31°	28°36'
	A	0,87	0,778	0,718
Кукурудза $Y = 0,58$	P	35°	36°30'	34°24'
	A	0,737	0,796	0,708
Горох $Y = 0,486$	P	25°	26°	24°12'
	A	0,533	0,558	0,507

Отримані результати показують, що кути внутрішнього тертя і коефіцієнти зсуву у несиметричних укосів більше, ніж у конусних симетричних. Оскільки інженерні стійкості укосів, різних насипів, тисків на підпірні стінки [64, 18] проводилися за даними для несиметричних укосів, на увазі простоти

вимірювання. У тих же роботах вказують на випадки обвалення в різних будівлях, хоча розрахунковий запас міцності по зрушенню був достатнім.

Що стосується норій, то використання даних опору зрушенню для несиметричних укосів призведе до недостатнього якості заповнення ковшів і невідповідності реальної продуктивності розрахункової. Крім того, буде отримано завищений опір зачерпування, що потребують підвищеної потужності приводу і підвищенню металоемності конструкції.

При визначенні опору прямому зсуву зернових матеріалів були поставлені наступні завдання:

1. Мінімізувати вплив насипної маси в рухомий рамці на величину ущільнюючого тиску (нормального напруги в шарі).

2. Забезпечити безперервність виміру зсувного зусилля, визначаючи його максимальну величину.

3. Визначити опір зрушенню при переміщенні рамки по жолобу, ширина якого співпадає з шириною рамки.

4. Визначити опір зрушенню при переміщенні рамки по поверхні зернового матеріалу без стінок.

5. Встановити характер зміщення шару в площині зсуву і його вплив на зміну зсувного зусилля.

Для виконання цих завдань дослідження проводилося на лотку, виготовленого на основі поліуретанових пластин. За допомогою спеціальної перегородки утворювався жолоб і плоска порожнина для утворення масиву зернового матеріалу. Для спостереження характеру переміщення шару в процесі зсуву бокова стінка ящика і рамка виконувалися зі склопластику. Для отримання достовірних результатів використовувалися дві рамки: мала і велика. Відповідно розміри внутрішньої порожнини становили 0,091x0,091 м і 0,091 і 0,2 м. Висота обох рамок становили 0,08 м. Ширина рамок по зовнішньому контуру становила 0,1 м. Такі ж розміри мав жолоб. Таким чином, при зсуві стінки рамки ковзали по стінках жолоба, і в зв'язку з вибраними матеріалами, і малою масою рамки

силою тертя можна знехтувати. Оскільки зсув відбувається в тонкому шарі з метою мінімізації впливу насипної маси в рамці, висота насипного матеріалу в рамці встановлювалася в межах 20-30 мм, що в 5-10 разів перевищувало середні розміри зернівок. Маса ущільнюючих вантажів на кромці встановлювалася в межах 0,5-2кг. Що стосується попереднього ущільнення зернового матеріалу перед зрушенням, то в літературних джерелах наводяться лише способи ущільнення (попереднє стиснення вантажем, віброзмішування в площині зсуву, струшування), проте дані про отримувані структури при цьому відсутні. Згідно з результатами аналітичного дослідження і даними багатьох авторів (Г. Клейн, Р. Тейлор і ін.) зрушення і перехід до щільної структури відбувається в тонкому шарі поділяючих поверхонь. Попереднє ущільнення впливатиме лише на масу матеріалу в зразку і на прискорення зростання зсувного зусилля, що ускладнює процес його вимірювання. Тому в наших дослідженнях процес зсуву проводився при насипній (пухкій) структурі матеріалу, масу якої (натуру) легко визначити. Це дозволило сповільнити процес наростання зсувного зусилля внаслідок переходу від пухкої до щільної структури і більш точно визначити його граничне значення.

Однією з найважливіших проблем при дослідженні характеру зміни і величини зсувного зусилля є вибір вимірювального пристрою. Як було встановлено Е. Дженіке та іншими дослідниками наростання зсувного зусилля до його граничної величини відбувається в короткий проміжок часу через малість переміщення частинок. Крім того його граничне значення має місце після початку зсуву. Процес носить динамічний характер. У зв'язку з цим є проблематичним застосування електронних вимірювальних приладів, як цифрових, так і записуючих, головними характеристиками яких є лінійність і швидкість наростання сигналу. З джерел по застосуванню тензометричних методів відомо, що похибка вимірювання може досягти 0,5 % при статичних процесах, і до 12 % – при динамічних. Внаслідок цього нами застосовувався механічний динамометр з великим для даного дослідження діапазоном

вимірюваного навантаження (до 2 кг) і з малою ціною поділки (0,05 кг).

Для отримання прийнятної точності вимірювання виконано калібрування точності показань за допомогою каліброваних вантажів, і побудовано графік залежності числа поділок шкали від навантаження. Точність результатів забезпечувалася кількістю повторів при надійності 95 % в залежності від попередньої відносної похибки вимірювання. У процесі дослідження коефіцієнти опору зрушенню визнався за отриманою аналітичною залежністю $\tau = 2\rho Y\lambda$, відповідно:

$$\lambda = \frac{\tau}{2\rho \cdot Y}, \quad (1.109)$$

де: $\tau = F_c / S$ – отримане експериментальне значення дотичного напружання при зсуві;

F_c – зсувна сила;

S – площа підстави рамки;

$p = \frac{9.81(m_c + m_r)}{S}$ – ущільнюючий тиск в шарі;

N – насипна маса;

h – висота шару зерна;

m_r – маса вантажу.

У табл. 1.16 наведені значення коефіцієнтів опору зсуву λ_1 , отримані за методом Е. Дженіке на жолобі, і для порівняння – λ_0 , отримані за параметрами вісеметричного укосу при різній вологості пшениці.

Дані були отримані як середня арифметична величина результатів повторних вимірів ($n = 9$), відповідно до відносної похибкою помилки $\bar{\Delta} = 0,91$ по 5 попередніми вимірами, і для надійності результатів в 95%.

Залежність коефіцієнтів опору зсуву від вологості пшениці

W	N	G	S	P	F_C	τ	λ_1	λ_0	H
%	кг/м ³	Н	м ²	Н/м ²	Кг	Н/м ²			М
9,7	755	6,74	0,00828	813,8	0,44	521,4	0,616	0,611	0,03
9,7	755	8,94	0,0182	431,4	0,588	316,07	0,619	0,611	
14,8	691	8,6		479	0,644	347,3	0,69	0,686	
17,4	660	8,437		463,6	0,656	353	0,734	0,725	
20,4	615	8,194		450,2	0,686	370	0,79	0,778	

При вологості $W = 9,7\%$ вимірювання проводили при зсуві малої ($S = 0,00828 \text{ м}^2$) та великої ($S = 0,0182 \text{ м}^2$) рамки. Значення λ_1 у всіх випадках незначно (в межах 1,5%) перевищували значення λ_0 .

У табл. 1.17 наведено порівняльні дані параметрів опору зсуву для пшениці, кукурудзи і проса, що відрізняються розмірами і формою. Дані були отримані при випробуваннях на жолобі на зерновому масиві.

Значення λ_1 при зсуві по жолобу більше значень λ'_1 , отриманих при зсуві по зерновому масиву, в свою чергу значення при зсуві рамки по масиву менше λ_0 . У всіх випадках значення відрізнялися на 1,7-2,8%, що для практичних розрахунків процесів цілком прийнятне.

Ширина ящика для зерна дозволяла встановити перегородку для утворення в зерновому масиві каналу, по якому також пересувалися рамки трьох розмірів.

Таблиця 1.17

Значення коефіцієнтів λ при зсуві по жолобу, по масиву і по схилу.

Матеріал	N	F_C	T	P	λ_1	λ_0	Δ
	кг/м ³	Кг	Н/м ²	Н/м ²	-	-	М
Пшениця $W = 10,9\%$, жолоб	746	0,385	456,1	738,65	0,617	0,613	0,02
Пшениця $W = 10,9\%$, масив	746	0,375	449	738,65	0,608	0,613	0,02
Пшениця $W = 16,8\%$, жолоб	734	0,51	604,24	807,8	0,719	0,712	0,03
Пшениця $W = 16,8\%$, масив	734	0,5	592	807,8	0,705	0,712	0,03
Кукурудза $W = 11,4\%$, жолоб	685	0,62	633,25	809	0,782	0,76	0,03
Кукурудза $W = 11,4\%$, масив	685	0,6	612,8	809	0,757	0,76	0,03
Просо $W = 16,4\%$, жолоб	738	0,377	446,8	736,7	0,616	0,6	0,02
Просо $W = 16,4\%$, масив	738	0,362	429	736,7	0,59	0,6	0,02

Вплив стінки, при випробуваннях зсуву на жолобі на опір зсуву оцінювався коефіцієнтом бічного тиску ε , за залежністю:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1 - \lambda'_1}{\lambda_1}. \quad (1.110)$$

Значення ε отримані в межах 1,033...1,045, в той же час для зв'язкових сипучих матеріалів цей коефіцієнт становить 1,4...1,7 [8]. Це свідчить про те, що зернові матеріали за цим показником близькі до ідеально пухких матеріалів та рідин, для яких $\varepsilon = 1$. Крім того, прийняте при аналітичному дослідженні положення про те, що $\sigma_x = \sigma_y = p$ є справедливим.

Результатами проведених досліджень встановлено, що при необхідності визначення коефіцієнта опору зрушенню (ефективного коефіцієнта внутрішнього тертя) для невідомих незв'язних сипучих матеріалів, застосування методу встановлення його величини, є більш простим, хоча при цьому потрібна більша кількість повторних дослідів.

Встановлено, що ущільнення структури відбувається тільки у верхній частині поверхні матеріалу в жолобі при незначному переміщенні рамки, величина якого залежить від кутової деформації структури, тобто від розмірів і форми частинок. При цьому зсувна сила і відповідно опір зрушенню досягає максимальної величини (рис. 1.31). При подальшому переміщенні рамки, її передня частина потрапляє на пухку структуру в жолобі, внаслідок чого зерна з рамки починають перетікати в шар жолоби, ущільнюючи його. В результаті рівень матеріалу в рамці зменшується в її передній частині, а верхня поверхня стає похилою (рис. 1.32). Внаслідок цього ущільнюючий тиск зменшується і зменшується сила зсуву. За рамкою утворюється канавка, дно якої має ущільнюючу структуру (рис. 1.33). Така ж картина спостерігається і при зсуві рамки по масиву. Але при цьому глибина канавки більше, оскільки частина матеріалу витісняється в бік.

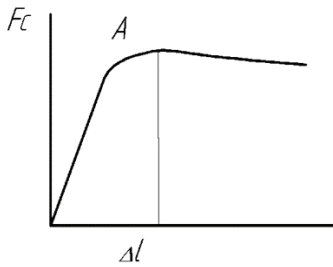


Рис. 1.31. Залежність зрушуючої сили від величини переміщення



Рис. 1.32. Процес зсуву рамки з зерном під вантаженням



Рис. 1.33. Утворення ущільненої, орієнтованої структури в процесі зсуву

Таким чином, твердження багатьох авторів [8,10,65] про те, що максимальна сила ϵ , при подальшому зсуві, величиною постійною, не відповідає дійсності. Тому за методом Е. Дженіке необхідно якомога точніше встановити максимальне значення зрушує сили (в т. ч, рис. 1.31).

На рис. 1.34 наведено лінії граничних дотичних напружень (меж плинності ПТ по Е. Дженіке) і граничних зсуваючих сил (функції течії ФІ по Е. Дженіке). Значення параметрів, що лежать вище цих ліній, будуть відповідати витіканню

зернового матеріалу, що лежать нижче – свідчать про відсутність витікання. Граничні лінії побудовано для пшениці вологістю 14,8 %. Граничний коефіцієнт опору зрушенню склав $\lambda = 0,686$ і відповідно кут зсуву (ефективний кут тертя по Е. Дженіке) $\rho = 34^{\circ}30'$. Обидві лінії виходять з початку координат, що характерно для незв'язних сипучих матеріалів.

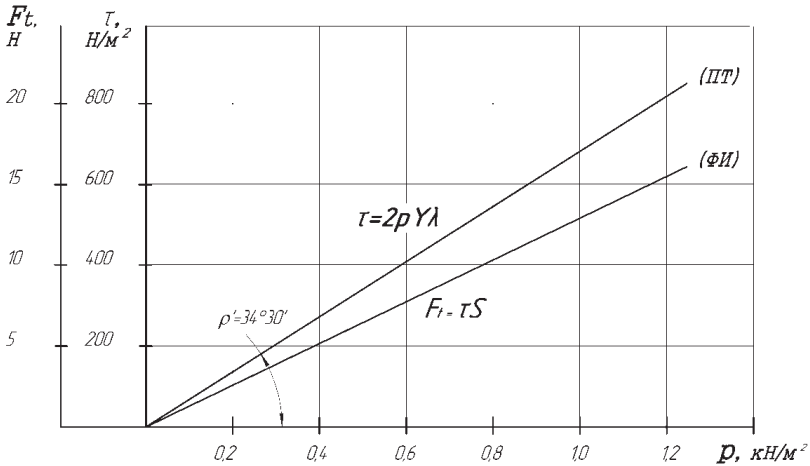


Рис. 1.34. Лінії граничних дотичних напружень (ПТ) граничних сил зсуву (ФН)

1.4.2. Визначення коефіцієнтів тертя зернових матеріалів при русі по опорних поверхнях

В процесі дослідження визначалися значення як статичного (спокою), так і динамічного (руху) коефіцієнтів тертя. В роботах [65, 66] наголошувалося на важливості вибору зернового зразка для отримання достовірних результатів.

Нами був використаний метод Е. Дженіке, з мінімізацією впливу маси зернового шару на нормальну силу, основну частину якої становить маса тарованого вантажу. З цією метою рамка з склопластикових пластин

заповнювалася зерном з висотою не більше чотирьох максимальних розмірів однієї зернівки. При цьому утворювався багаторядний шар. Досліджувався також зразок з однорядним шаром. В обох випадках шар накривався склопластиковою пластиною на яку встановлювався вантаж. Маса вантажу обиралася з умови можливості збільшення товщини шару (збільшення обсягу) внаслідок виходу частинок із зачеплення в щільному укладанню. Рамки використовувалися двох розмірів, для малої рамки, що використовувалася при визначенні коефіцієнта опору зрушенню в шарі, маса вантажу склала 2 кг. Зусилля зсуву фіксувалося в момент зсуву зі стану спокою і в процесі руху. Методикою передбачалося дослідження трьох типів зернових матеріалів з різною формою насіння: круглої – горох, округленої – пшениця і не округленої – кукурудза при різній вологості.

В процесі дослідження були отримані наступні результати. Для всіх зернових матеріалів, незалежно від їх вологості, коефіцієнт тертя руху (динамічний) виявлявся більше статичного (спокою). Такий ефект притаманний лише деякими полімерним матеріалам, які розм'якшуються від тертя в процесі руху. У зернових матеріалів цей ефект пояснюється тим, що до сил тертя спокою додаються сили тертя від взаємного зміщення частинок з обертанням в процесі руху. У цьому випадку коефіцієнт тертя руху визначається як:

$$f_d = f_{ст} + f_k. \quad (1.111)$$

Другий отриманий ефект полягає в тому, що при русі зернового матеріалу з вологістю більше 17–18% сила тертя є уривчастою: зв'язки частково розриваються і тут же відновлюються (рис. 1.36, а). Цей ефект спостерігається при русі незакруглених зерен, і відсутній для круглих зерен (рис. 1.36, б). Крім того, такий ефект притаманний при русі по поліуретану, в меншій мірі по нержавіючій сталі, і відсутній у всіх випадках при русі однорядного шару.

Результати досліджень наведено на рис. 1.35 і в табл. 1.18 і 1.19.

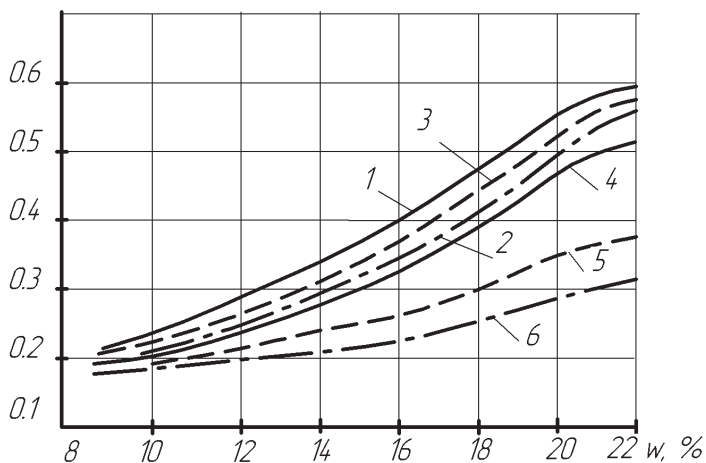


Рис. 1.35. Динамічний і статичний коефіцієнти тертя культур в залежності від вологості:

1 – кукурудза f_d ; 2 – кукурудза $f_{ст}$; 3 – пшениця f_d ; 4 – пшениця $f_{ст}$;
5 – горох f_d ; 6 – горох $f_{ст}$

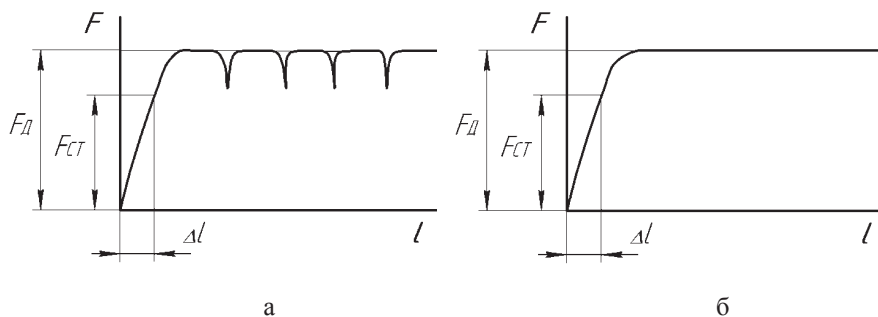


Рис. 1.36. Характер зміни рушійної сили:

а) висока вологість, багаторядний шар, пшениця, кукурудза; б) низька вологість, однорядний шар, горох

Таблиця 1.18

Коефіцієнти тертя пшениці по поліуретану

Вид Шару	Вологість, W, %	8,8	12,8	14,9	18,2	21,3
Багаторядний	F_N , кг	2,158	2,154	2,149	2,145	2,144
	F_{CT} , кг	0,35	0,53	0,634	0,84	1,12
	F_D , кг	0,48	0,63	0,77	0,94	1,25
	f_{CT}	0,179	0,246	0,31	0,39	0,523
	f_D	0,222	0,291	0,357	0,44	0,584
	f_K	0,043	0,045	0,046	0,05	0,061
Однорядний	F_N , кг	2,06				
	F_{CT} , кг	0,3	0,436	0,52	0,66	0,81
	F_D , кг	0,35	0,476	0,596	0,749	0,91
	f_{CT}	0,15	0,218	0,26	0,33	0,405
	f_D	0,175	0,248	0,295	0,37	0,455
	f_K	0,025	0,03	0,036	0,04	0,05

Таблиця 1.19

Коефіцієнти тертя пшениці по нержавіючій сталі

W, %	Вид шару	F_N , кг	F_{CT} , кг	F_D , кг	f_{CT}	f_D	f_K
9,0	Багаторядний	2,158	0,27	0,288	0,125	0,144	0,019
	Однорядний	2,06	0,23	0,25	0,115	0,125	0,01
21,1	Багаторядний	2,140	0,64	0,75	0,3	0,35	0,05
	Однорядний	2,04	0,4	0,48	0,2	0,24	0,045

Третій зафіксований ефект полягає в тому, що при вологості більше 21,5-22% коефіцієнти тертя практично не збільшуються. Так, наприклад, для кукурудзи при вологості 22 % – $f_D = 0,6$, $f_{CT} = 0,575$, при вологості 30,9% – $f_D = 0,59$, $f_{CT} = 0,555$; для пшениці при вологості 22,1% – $f_D = 0,57$, $f_{CT} = 0,54$, при вологості 28% – $f_D = 0,56$, $f_{CT} = 0,535$; для гороху при вологості 21,8% – $f_D = 0,37$, $f_{CT} = 0,32$, при вологості 26,5% – $f_D = 0,34$, $f_{CT} = 0,33$.

Це свідчить про те, що при вологості понад 22% матеріал стає вологим, а мокрим і міцність зв'язків не збільшується.

Необхідно зазначити, що зі зміною навантаження коефіцієнти тертя практично не змінюються, так як при цьому відповідно змінюються зсувні сили $F_{ст}$ та $F_{д}$. На приклад для кукурудзи вологістю 10% при навантаженні $F_N = 2,165\text{кг}$ – $f_{д} = 0,25$, $f_{ст} = 0,28$, а при навантаженні $F_N = 1,165\text{кг}$ – $f_{д} = 0.239$, $f_{ст} = 0.271$.

1.4.3. Визначення параметрів зернового потоку з живильного лотка норії

Це експериментальне дослідження проводилось для визначення швидкості та висоти потоку, умови виникнення його лавиноподібного характеру. З цією метою було розроблений спеціальний пристрій (рис. 1.37), який складається з двох частин. Верхня, являє собою завантажувальний бункер для створення потоку в живильному лотку. Величина створюваного потоку регулювалась вертикальною заслінкою, на якій нанесено шкалу для регулювання витрати потоку. Нижня частина також являла собою бункер з нахиленою поверхнею під кутом 50° , виготовленої із поліуретану. Вона імітувала прийомний лоток норії. Вдовж цієї поверхні закріплена шкала для визначення точок падіння потоку, а в перпендикулярнім напрямі встановлена шкала для вимірювання початкової і кінцевої висоти потоку. Для дослідження параметрів були вибрані на горизонтальному рівні три напрями падіння потоку з верхнього бункера.

Обидві бокові стінки верхньої і нижньої частини пристрою були виконані з прозорого скло пластику. Методика експерименту передбачала наступний порядок проведення дослідів. Час утворення потоку з завантажувального бункера визначався попередньо з встановленням сталої висоти потоку в живильному лотку. За прийнятими розмірами опорної поверхні і висоти засипаного матеріалу він складав 2 секунди. Регулювання потоку з верхнього бункера виконувалось висотою підйому заслінки, яка складана 30 мм при іспитах для всіх матеріалів. В процесі іспиту виконувалась відео- та фотозйомка з

послідуючим відліком часу руху потоку, та вимірюванням висоти потоку в точці прямого падіння h та в точці виходу h_{max} . Довжина обох бункерів складає 300 мм, висота – 330 мм, ширина потоку – 97 мм.



Рис. 1.37. Вигляд дослідної установки, завантаженої горохом

Параметри потоку визначалися в трьох точках падіння зерна, точка 1 – на відстані 120 мм від точки виходу, точка 2 – по середині бункера – 140 мм, точка 3 – на відстані від протилежного краю бункера – 99 мм.

Відсічена частина потоку збиралась в спеціальну тару, визначався її об'єм і встановлювалась величина витрати за час руху.

Швидкість потоку визначалась як:

$$g = \frac{Q}{h \cdot v} \quad (1.112)$$

та порівнювалась з її теоретичним значенням. Кількість дослідів з досягненням проценту надійності 95% за даними планування експерименту складала шість досліджень.

Результати відеозйомки дозволили виявити характер лавиноподібності потоку, та контролювати виміряну його висоту. Визначався коефіцієнт розширення потоку $K_h = h_{\max} / h$. Результати дослідження зведено до табл. 1.20. Характер траєкторії руху зерна та розширення потоку наведено на рис. 1.38.

Таблиця 1.20

Параметри лавиноподібного потоку

	№	Висота падіння H_1 , мм	Висота падіння H_2 , мм	Витрата Q , л/с	h , мм	h_{\max} , мм	g_T , м/с		g_E , м/с	K_h
Кукур удза	1	202	130	0,325	19,6	40,18	1,77		1,81	2,22
	2	160	170		18,6	39,15	1,72		1,776	2,05
	3	118	212		18,4	30	1,96		1,96	1,81
Пшени ця	1	202	130	0,400	22	48	1,85		1,846	2,18
	2	160	170		19,6	39	1,9		2,1	1,938
	3	118	212		19	34	1,93		2,147	1,789
Горох	1	202	130	0,300	17,9	50	1,82		1,84	2,9
	2	160	170		15,8	40	1,93		1053	2,53
	3	119	212		15	34,5	1,947		2,0	2,3

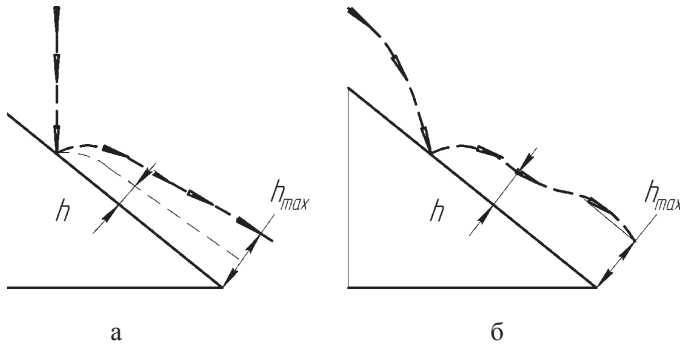


Рис. 1.38. Характер потоку при прямому падінні матеріалу (а) та при косому падінні (б)

У процесі дослідження визначався характер руху живильного потоку, для цього використовувалися два способи подачі: прямий (вертикальний) і косий. При прямому способі подачі коефіцієнт розширення вищий за рахунок відскоку зерен під час удару, що і призводить до значного збільшення висоти потоку. При

косому ударі характер руху потоку носить класичний характер, наведений в роботах [9,67,68], з меншим відскоком, з утворенням хвилі і її розсіпанням з утворенням кінцевої висоти потоку. Дослідження в точці падіння 2, показали що висота потоку буде менша. При цьому $h_{\max} = 1,15 \cdot h$, а $h_B \approx 1,45 \cdot h$.

На рис. 1.39 представлено скріншоти відео потоку: пшениці при косому падінні та соняшника при прямому падінні

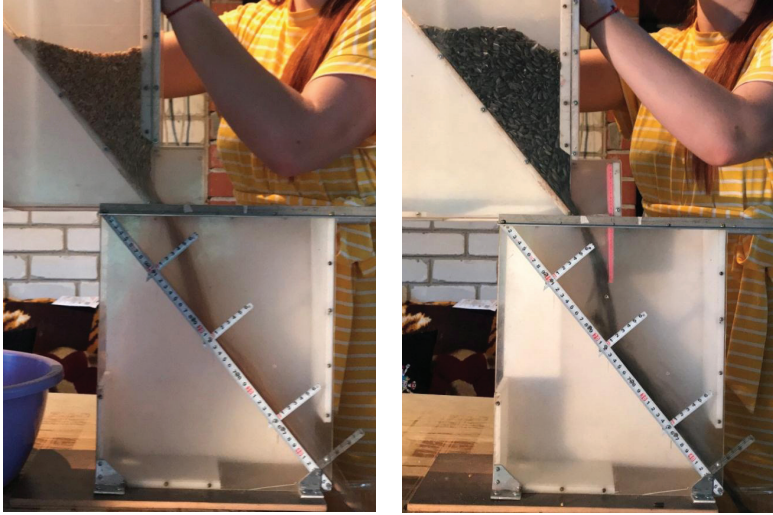


Рис. 1.39. Скріншоти відео потоку: пшениці при косому падінні та соняшника при прямому падінні

Результати досліджень дозволили отримати ще один важливий результат. Враховуючи динаміку руху сипкого матеріалу та висоту потоку, швидкість руху потрібно визначити за емпіричною формулою, яка враховує прискорення вільного падіння:

$$g = \frac{Q \cdot g}{h \cdot A}, \quad (1.113)$$

$$h = \frac{Q \cdot g}{g \cdot A}, \quad (1.114)$$

де: A – ширина робочої поверхні лотка.

Зараз у норіях виробниками застосовується здебільш пряма подача матеріалу в живильний лоток (рис. 1.40, а), однак можливо створити і косу подачу, за рахунок нахилу живильної труби [69, 70]. В деяких норіях закордонних виробників випробують косу подачу (рис. 1.40, б) [7, 71].

Треба відмітити, що визначення параметрів косоного потоку значно ускладнюються розрахунком траєкторії падіння (яка, як відомо, є параболічною) в залежності від початкової швидкості виходу з живильного пристрою.

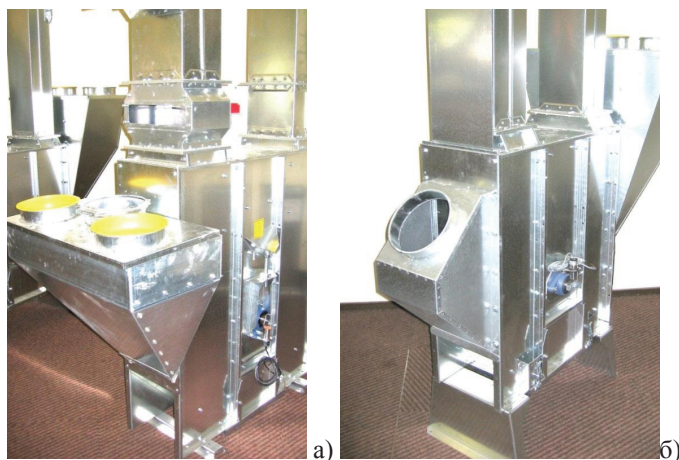


Рис. 1.40. Типові завантажувальні частини норій під пряму та косу подачу матеріалу

За отриманими результатами досліджень можна надати наступні рекомендації. Не застосовувати пряму подачу для кулеподібних крупних зерен: гороху, сої та ін., не застосовувати для сипких матеріалів з вологістю до 12 %. Косу подачу застосовувати обов'язково для тягових органів з кількістю ковшів на 1 м, яка наближається до максимального допустимого. В цьому випадку розширений потік не може повністю потрапити в ківш.

Висновки до розділу 1.4

1. Встановлено, що кут природного укосу, можливо, визначити трьома способами: при утворенні укосу шляхом насипання матеріалу на опорну поверхню, освітою укосу за допомогою утворює циліндра і в ящику Кулона з підйомної стінкою. У перших двох випадках утворюється осесиметричний укіс у вигляді конуса. В ящику Кулона при підйомі стінки відбувається обвалення сипучого матеріалу з утворенням несиметричного укосу.

2. Визначено, що кути внутрішнього тертя і коефіцієнти зсуву у несиметричних укосів більше, ніж у конусних симетричних. Використання даних опору зрушенню для несиметричних укосів призведе до недостатнього якості заповнення ковшів і невідповідності реальної продуктивності розрахункової. Крім того, буде отримано завищений опір зачерпування, що потребують підвищеної потужності приводу і підвищенню металоемності конструкції.

3. Результатами проведених досліджень встановлено, що при необхідності визначення коефіцієнта опору зрушенню (ефективного коефіцієнта внутрішнього тертя) для невідомих незв'язних сипучих матеріалів, застосування методу встановлення його величини, є більш простим, хоча при цьому потрібна більша кількість повторних дослідів.

4. Встановлено, що ущільнення структури відбувається тільки у верхній частині поверхні матеріалу в жолобі при незначному переміщенні рамки, величина якого залежить від кутової деформації структури, тобто від розмірів і форми частинок.

5. Визначено граничні дотичні напруження і граничні зсуваючі сили для пшениці з вологістю 14,8 %. Граничний коефіцієнт опору зрушенню склав $\lambda = 0,686$ і відповідно кут зсуву (ефективний кут тертя по Е. Дженіке) $\rho = 34^\circ 30'$. При вологості більше 21,5-22% коефіцієнти тертя практично не збільшуються. Для кукурудзи при вологості 22 % – $f_d = 0,6$, $f_{CT} = 0,575$, при вологості 30,9% –

$f_d = 0,59$, $f_{CT} = 0,555$; для пшениці при вологості 22,1% – $f_d = 0,57$, $f_{CT} = 0,54$, при вологості 28% – $f_d = 0,56$, $f_{CT} = 0,535$; для гороху при вологості 21,8% – $f_d = 0,37$, $f_{CT} = 0,32$, при вологості 26,5% – $f_d = 0,34$, $f_{CT} = 0,33$. Це свідчить про те, що при вологості понад 22% матеріал стає не вологим, а мокрим і міцність зв'язків не збільшується. Зі зміною навантаження коефіцієнти тертя практично не змінюються, так як при цьому відповідно змінюються зсувні сили F_{CT} та F_d . На приклад для кукурудзи вологістю 10% при навантаженні $F_N = 2,165\text{кг}$ – $f_d = 0,25$, $f_{CT} = 0,28$, а при навантаженні $F_N = 1,165\text{кг}$ – $f_d = 0,239$, $f_{CT} = 0,271$

6. Визначено, що при прямому способі подачі коефіцієнт розширення вищий за рахунок відскоку зерен під час удару, що і призводить до значного збільшення висоти потоку. При косому ударі характер руху потоку носить класичний характер, з меншим відскоком, з утворенням хвилі і її розсипанням з утворенням кінцевої висоти потоку.

7. Результатами експериментальних досліджень встановлено, що не застосовувати пряму подачу для кулеподібних крупних зерен: гороху, сої та ін., не застосовувати для сипких матеріалів з вологістю до 12 %. Косу подачу застосовувати обов'язково для тягових органів з кількістю ковшів на 1 м, яка наближається до максимального допустимого.

8. Результати роботи та розроблені рекомендації можна використати, як на стадії проектування нових машин, так і при модернізації існуючих з метою підвищення їх продуктивності. Одержані результати роботи впроваджено у виробничій процес: при розробці норій продуктивністю 100-350 т/год і висотою 30-60 м на Карлівському машинобудівному заводі та Харківському заводі елеваторного обладнання; для налаштування норій до роботи в оптимальному режимі на ООО СП «Білий колодязь». Результати роботи випроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1.1

1. Бернштейн М. С. О статических свойствах несвязного сыпучего тела в предельном равновесии. Массивные и стержневые конструкции. Госиздат литературы по строительству и архитектуре, 1952. 128 с.
2. Галышев В., Тухвагулин М. Эффективная работа нории *Хлебпродукты*, 2000. № 8. С. 14–16.
3. Богомолов О. В., Кись-Коркіщенко Л. В. Визначення конструктивно-кінематичних параметрів завантаження зернових норій проти ходу. *Тези доповідей XVI-го міжнародного форуму молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (25-26 березня 2020 р., м. Харків)*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2020. С. 29.
4. Волошин Е. В. Элеваторы и склады. Расчет основного технологического оборудования. Учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. 98 с.
5. Beumer В., Wehmeier К. Zur Frage des Schopfwiderstandes und der Auswurfverheltnisse bei Becherweren. *Fordern und Heben*, 1950. № 11. P. 110–118.
6. Платонов П. М. Физико-механические свойства зерна в связи с автоматизацией технологических процессов. *Пищевое машиностроение*. 1960. № 3. С. 34–37.
7. Аржанов В. Г., Солунский Д. А., Тантлевский А. В. Повышение эффективности работы зерновых норий. *Промышленный транспорт*, 1985. № 10. С. 14–15.
8. Усов К. А., Рычков В. А. Исследование ковшовых элеваторов без дна. *Сб. науч. труд. ВНИИПНАШ*. 1982. С. 34–42.
9. Hurburgh Charles R. Jr. Identification and Segregation of High-Value Soybeans at a Country Elevator. *Journal of American Oil Chemists Society*, 1994. № 71(10). P. 1073–1078.
10. Beverly G.J., Roberts A. W., Hayes J. W. Mechanics or high speed elevator discharge. *Bulk Solids Handling*, 1983. Vol. 3. № 4. p. 853–859.

11. Карнаушенко Л. И. Критерии сыпучести порошкообразных материалов. *Изд. вузов. Пищ. техн.*, 1989. № 2. С. 97–100.
12. Гофштенгель Г. Перемещение массовых грузов. М. Оргметалл, 1927. 136 с.
13. Shabana A. A. *Dynamics of Multibody Systems*. 2nd ed. Cambridge University Press. Cambridge, 2003. 384 p.
14. ASTM E 112 – 10 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 26 p.
15. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А., Попухин А. И. Подъемно-транспортные машины зерноперерабатывающих предприятий. М. Агропромиздат, 1985. 320 с.
16. Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск. Высшая школа, 1985. 350 с.
17. Abdulmazhidov Kh. Design and calculation of ground transport and technological machines, 2018. 10.18411/lj-09-2018-89.
18. Гайнуллина А. А. и др. Влияние геометрии проточной части расходомерного сопла на величину коэффициента истечения. *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. № 4. С. 343–347.
19. Лебедев А. Е. К расчету процесса ударного взаимодействия потока твердых частиц с преградой. *Известия ВУЗов. Химия и химическая технология*, 2011. Т. 54. Вып. 6. С. 105–106.
20. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підймальних і транспортувальних машин. Підручник для ВУЗів. Київ: Вища школа, 2009. 248 с.
21. Федосеев В. Б. Исследование внутреннего трения пшеницы в зависимости от влажности. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки*. 2005. № 56. С. 14–18.
22. H. Sachs. Opportunities for elevator energy efficiency improvements. *Technical report, American Council for an Energy-Efficient Economy Washington, DC* 2005. P. 1–11.
23. Лук'янов І. М., Кісь-Коркіщенко Л. В., Годуненко М. Ю., Шмуляк

А. В. Скінчено-елементна модель стрічкового ківшевого елеватора для сипких матеріалів. *Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні напрямки технології та процесів переробних і харчових виробництв» (5-6 листопада 2020 р., м. Харків)*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2020. С. 47–48.

24. Дерсевич Г. И. Механика зернистой среды. Проблемы механики. М. Вып. III. 1961. 368 с.

25. M. Sinnott, J. Hilton, W. McBride, P. Cleare. Coupled gas-particulate discharge from a bucket elevator. *Powder Technol*, 2017. № 314. P. 203–217.

26. Барышев А. И., Будишевский В. А., Скляров Н. А., Сулима А. А., Ткачук А. М. Расчет и проектирование транспортных средств непрерывного действия. Научное пособие для вузов. / Под общ. ред. В. А. Будишевского. Донецк, 2005. 689 с.

27. Богомолов О. В., Кісь-Коркіщенко Л. В. Вплив пружних властивостей та опору зсуву шарів зернових матеріалів на зачерпування. *Тези доповідей XV-го міжнародного форуму молоді «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (4-5 квітня 2019 р., м. Харків)*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2019. С. 42.

28. Моделивання процесу здрібнення зернівки у робочій камері здрібнювача сколювальної дії / Богомолов О. В., Ірклієнко В. І., Завгородній О. І., Нетецький Л. Г., Кісь-Коркіщенко Л. В. *Журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*, 2021. №23. С. 194–199.

29. Дерягин Б. В. Тела сыпучие. *Физический словарь*. М. 1937. Т. 5. С. 33–34.

30. Лукьянов И. М., Кись Л. В., Бурда Н. В., Осика А. Н. К определению тяговой способности ленточно-барабанных механизмов норий с различными типами лент. *«Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»*. Харків: ХНТУСГ, 2018. Вип. 194. С. 78–89.

31. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кісь-Коркіщенко Л. В. До визначення конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів норій проти ходу робочого елемента. *Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки»*. Кропивницький: ЦНТУ. 2019. С. 66–68.
32. Blundell M., Harty D. *The Multibody System Approach to Vehicle Dynamics*. Elsevier, 2004. 518 p.
33. Таубер Б.А. Подъемно-транспортные машины. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Экология, 1991. 528 с.
34. Пат. 13397 Україна, МПК В65G 23/04 (2006.01), В65G 17/36 (2006.01). Ківшевий елеватор / Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кісь Л. В.; заявник Лук'янов І. М. – № u 2018 05427; заяв. 16.05.2018; надрук. 10.12.18, Бюл. № 23.
35. Гордеева А. Б., Федосеев В. Б., Кунаков А. С. Исследование капиллярных сил когезии между зернами пшеницы. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки*. Ростов-на-Дону. 2005. № 51. С. 86–89.
36. Федосеев В. Б. Сухое и вязкое трение сыпучих тел. *Известия вузов. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки*, 2005. № 1. С. 93–96.
37. McBride W., Sinnott M., Cleary P. Discrete element modelling of a bucket elevator head pulley transition zone. *Granul. Matter*, 2011. № 13. P. 169–174.
38. Ерохин М. Н., Казанцев С. П. Подъемно-транспортные машины. М.: Колос, 2010. 335 с.
39. Gelnar, Daniel & Zegzulka, Jiri.. Basic Description of Bucket Elevators: Verification and Validation of 3D Models, 2019. P. 35–44. Doi.org/10.1007/978-3-030-05713-8_3.
40. Udovikova Svitlana, Akmen Viktorija, Gaidar Sergey, Zaitsev, Yurii. Improved inclined bucket elevator designs for bulk materials with a flexible tape.

Collection of scientific works of the Ukrainian State University of Railway Transport, 2019. 187. P. 75–84. Doi.org 10.18664/1994-7852.187.2019.196352.

41. Gelnar, Daniel & Zegzulka, Jiri. Bucket Elevator Filling and Discharge: Verification and Validation of 3D Models. Springer, 2019. 586 p. 10.1007/978-3-030-05713-8_4.

42. Лукьянов І. М. Обґрунтування кінематичних зернових елеваторів з відцентровим розвантаженням: дисерт. канд. техн. наук. УПА. Харків, 2016. 192 с.

43. Wang J., Zhang H., Zhang Y. Research on key Technologies of modular and rapid design for bucket elevator. *Mech. Des*, 2012. № 29(11). P. 12–18.

44. Vitrukh P. Modeling of performance in estimation of design parameters transport-technological machines. *Mehanization and electrification of agricultural*, 2019. P. 220-227. 10.37204/0131-2189-2019-10-23.

45. Borzony T., Hasley T., Eckel R. To scenarios for ovalanche dynamics in inclined granular tayers. *Physical Review Letters*. BOOL. 2005. 84/20. P. 18.

46. Иванченко Ф. К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных машин. Киев: Выща школа. Головное издательство, 1988. 424 с.

47. Пунков С. П., Стародубцева А. И. Хранение зерна, элеваторно-складское хозяйство и зерносушение. М.: Агропромиздат, 1990. 367 с.

48. Злочевский В. Л., Борисов А. П. Исследование прочностных свойств зерновых материалов. СПб.: Издательство «Лань», 2017. 180 с.

49. Богомоллов А. В., Белостоцкий В. А., Лукьянов И. М. Определение прочности зерна пшеницы при ударе и выбор кинематического режима работы нории. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Випуск № 152. Матеріали XV Міжнародної наук.-практ. конф. «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв»*. Харків, 2014. С. 26–33.

50. Li Yaoming, Chandio Farman Ali, Ma Zheng, Lakhiaer Imran, Sahito Abdul Razaque et. al. Mechanical strength of wheat grain varieties influenced by moisture content and loading rate. *International Journal of Agricultural and Biological*

Engineering, 2018. № 11. P. 35-41. 10.25165/j.ijabe.20181103.3737.

51. Gupta R. K., Das S. K., Fracture resistance of sunflower seed and kernel to compressive loading, *J of Food Engg*, 2000. № 46. P. 1–8.

52. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А. Подъемно-транспортные установки: учебник / по направлению «Пищевая инженерия». Москва: КолосС, 2007. 465 с.

53. Korzen, Z., Dudek, K.: Reclaiming with a high-speed bucket wheel with centrifugal discharge. *Bulk Solids Handling*, 1991. № 11(3). P. 615–626.

54. Ловейкин В. С., Боргун В. Н. Оптимізація режиму пуску ківшового елеватора при транспортуванні подрібненої деревени та продуктів її переробки. *Науковий вісник НУБІП України. Серія: Техніка і енергетика АПК*. К., 2012. Вип.170. Ч.1. С. 160–169.

55. Species composition of macrobiotic of cows udder and raw milk quality at mastitis / A. P. Paliy, Y. S. Ulko, O. O. Bogomolov, L. V. Kis-Korkishchenko, M. D. Kambur, A. A. Zamazyi, N. M. Brit, I. M. Boiko, I. V. Grebnova, Y. O. Kovalchuk, A.P.Paliy. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2020. 10(3). P. 78–85. doi: 10.15421/2020_171.

56. Смолин Ю. П. Сопротивление песчаных грунтов сдвигу при воздействии вибрации. *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*, 2016. №3 (38). С. 36–41.

57. Koster, K.: Development and state of the art in heavyduty bucket elevators with central chains – part 2. *ZKG International*, 1996. 49(4). P. 173–187.

58. Vander Voort George. Grain Size Measurement Methods: A Review and Comparison. *Microscopy and Microanalysis*, 2013. № 19. P. 1760–1761. doi.org/10.1017/S1431927613010799.

59. Садовский В. Н. Исследование моделирования в задачах динамики сыпучих тел. *Труды математического центра им. Н.И. Лобачевского*. Казань, 2002. Т.15. С. 183–198.

60. Бедич Т. В. Совершенствование процессов транспортирования зерна на основе применения полимерных материалов. *Наука*. Костанай. 2006. № 1.

C. 121–125.

61. Бедич Г. В. К вопросу снижения травмируемости зерна в загрузочной части нории. *Наука*. Костанай. 2005. № 1. С. 4–10.

62. K. Koster. Bulk material discharge of bucket elevators, especially high-capacity bucket elevators. *Aufbereitungs-Technik*. 1984. 25(8). P. 450-463.

63. Su J., Song H., Duan L., Song Z., Yan Y., Li J., Li F. Optimization design of bucket elevator based on solid works. *Hebei Ind. Sci. Technol.* 2016. 33(5). P. 415-422.

64. Колимбас Д., Лавриков С. В., Ревуженко А. Ф. Однородное деформирование сыпучей среды. *Теория и эксперимент* ПМТФ. 1994. Т.35. № 6. С. 114–121.

65. Рычков В. А., Зорин В. Ю. Метод теоретического расчета заполнения ковшей элеватора. *Сб. научн. трудов ВНИИПТИагропром*. Рязань, 1984. С. 32–38.

66. Kaliniewicz, Zdzisław & Markowski, Piotr & Anders, Andrzej & Jadwisińczak, Krzysztof. Frictional properties of selected seeds. *Technical Sciences*, 2015. № 18. P. 85–101.

67. Kruggel-Emden H., Sudbrock F., Wirtz S., Scherer V. Experimental and numerical investigation of the bulk behavior of wood pellets on a model type grate. *Granular Matter*, 2012 14(6). P. 681–693.

68. Jaskulski, A.: Engineer-to-order approach to high speed bucket elevator design in a small-enterprise. *Applied Engineering in Agriculture*, 2008. 24(5). P. 545–557.

69. Beverley G., Roberts A., Hayes J. Mechanics of high speed elevator discharge. *Bulk Solids Handling*, 1983. 3(4), P. 853–859.

70. Jaskulski A. Methodology of multi-criteria optimization of appliances for vertical grain transportation. Ph.D. thesis, Warsaw University of Technology, 1992. 168 p.

71. Boate F.E., Wroge H. High-performance bucket elevator sets new records at Lehigh Cement's Union Bridge. *ZKG INTERNATIONAL*, 2002. Vol. 55. P. 48–53.

РОЗДІЛ 2

НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ РУСІ ПО РОБОЧИМ ОРГАНАМ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОГО СЕНПАРАТОРА

2.1. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКИ СУМІШІ «ЗЕРНО-ДОМІШКИ» НА ТАРІЛЧАСТОМУ РОЗКИДАЧІ

При очищенні зернової маси для подальшого отримання насінневого матеріалу важливим етапом є вилучення домішок та отримання фракцій, з якої і буде вироблятися насінневий матеріал. На цьому етапі доречно використовувати машини з високою продуктивністю, але за умови, що травмованість зерна буде знаходитись в допустимих межах. У відповідності до ДСТУ 4138-2002 [1] до домішок відносять рештки зерновок, які втратили половину чи більше свого розміру, пусті колоски, квіткові оболонки, плівки, обломки стебел, листя, гниле і зерно, що проросло, грибокві утворення, ґрунт, каміння, пісок, тощо. Для виділення цих домішок доречно використовувати одночасно повітряну та решітну сепарацію. Проводити ці операції можна як на плоско решітних, так і на вібровідцентрових сепараторах. Вібровідцентрові сепаратори мають більшу продуктивність [2,3], тому зупинимось на очищенні зернової маси ними (рис. 2.1).

За технологією спочатку відбувається повітряна очистка від легких домішок за аеродинамічними властивостями, а далі – решітна очистка [4-6].

За допомогою повітряної очистки можна виділити легкі домішки та частину дрібних домішок (рис. 2.2.), що за своїми аеродинамічними властивостями також потрапляють до легких домішок [6, 7].

Очищення від легких домішок і пилу в розробленому пневмосепаруючому пристрої розглядаємо в двох зонах: основній зоні очистки та додатковій. В основній кільцевій зоні вилучення легких домішок можливе на ділянці, обмеженій розкидачем та пластиною пневмосепаруючого пристрою (рис. 2.3).



Рис. 2.1. Сепаратор СВС-25 з пневмосепаруючий пристроєм та решітним блоком



Рис. 2.2. Домішки виділені за аеродинамічними властивостями



Рис. 2.3. Пневмосепаруючий пристрій

Але, внаслідок того, що при сході з розкидача як зернова так і домішкова фази мають горизонтальні та вертикальні швидкості, які впливають на ефективність процесу очистки, то спочатку необхідно дослідити і встановити закономірності руху зернової маси (зернової суміші) на тарілчастому розкидачі. Значення швидкостей сходу будуть вихідними даними для дослідження нелінійної динаміки руху багатофазного середовища в основній кільцевій зоні.

Тарілчастий розкидач пневмосепаруючого пристрою разом з решітним блоком обертається навколо вертикальної вісі з кутовою швидкістю $\bar{\Omega}$. Він має увігнуту колово-конусну поверхню, яка розділена радіальними перегородками S_5, S_6 , що утворюють канали $/V/$, що розходяться під кутом β_1 (рис. 2.4).

Зернова маса захоплюється живильником та транспортується до бункеру, з якого надходить на тарілчастий розкидач. і втягується перегородками разом з ним в обертальний рух. При обертанні розкидача виникають сили інерції, що змушують суміш рухатися по каналах в напрямку периферії. Маючі різний розмір та щільність зерно та домішки перерозподіляються при русі по розкидачеві та набувають різні швидкості на виході з каналів. Завдяки цьому і можливий поділ двофазного середовища на складові.

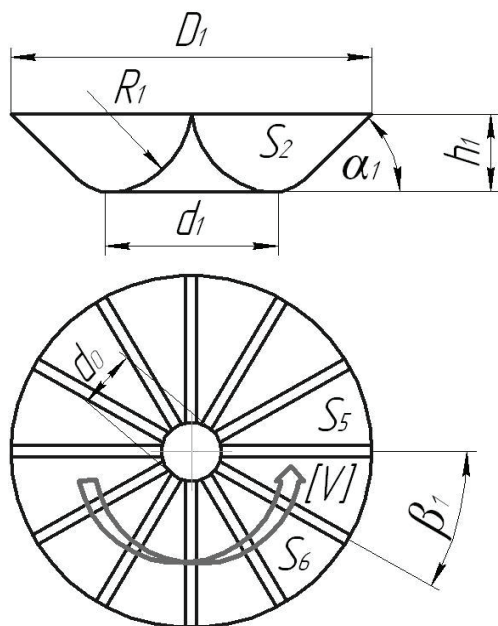


Рис. 2.4. Розрахункова схема тарілчастого розкидача

Зернова маса, що надходить з бункера на поверхню тарілчастого розкидача, утворює шар змінної товщини. При цьому має місце складна взаємодія двофазного середовища. На відміну від руху одиничних частинок, що має місце в неусталеному русі (при пуску та зупинці сепаратора) коли можна знехтувати взаємодією з іншими частинками, при усталеному русі (робочому циклі) необхідно врахувати взаємодію зернових частинок між собою, їх взаємодію з зовнішніми силовими полями, домішкою і поверхнею ротора. Форму вільної поверхні шару зернової маси визначимо розв'язанням задачі його динаміки [8, 9].

Розглянемо шар зерна з домішкою, що рухається по поверхні тарілчастого розкидача, що обертається з кутовою швидкістю $\bar{\omega}$ (рис. 2.5). Частинки зерна і домішки беруть участь в складному русі, що складається з переносного руху

ротора і відносного руху в системі координат, пов'язаної з розкидачем [10]. Кожна з компонент суміші (зерно та домішки) рухається як суцільне середовище, що характеризується своїм полем швидкостей: \vec{v}_1 – для зерна і \vec{v}_2 – для домішки.

Потрапляння зернової маси на вільну поверхню шару, що утворюється на тарілчастому розкидачу можна розглядати як надходження зерна з домішками у вигляді однорідного потоку суспензії твердих частинок в повітрі. Процес надходження-осадження твердих частинок на вільну поверхню можна розглядати як фазовий перехід розпоросених в повітрі твердих частинок в якесь сипке середовище, що утворює шар. Конкретне місце потрапляння зернової маси з завантажувального пристрою на вільну поверхню носить ймовірнісний характер і встановлює початкові умови руху частинок фаз по розкидачу.

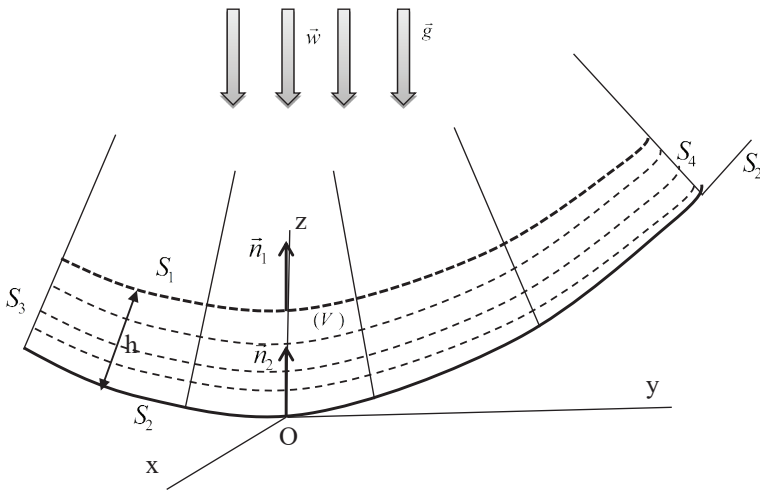


Рис. 2.5. Розрахункова схема ділянки тарілчастого розкидача з потоком двофазної суміші

На частинки обох компонент (зернової та домішкової фаз) діють сили тяжіння. Інтенсивність цих сил дорівнює прискоренню вільного падіння \vec{g} . Вони спрямовані вниз вздовж осі обертання розкидача. Крім того внаслідок контакту між частинками виникають сили взаємодії. На розкидачеві взаємодіють три фази: повітря, зернова та домішкова фаза, але так як щільність повітря ρ_3^0 набагато менша за дійсну щільність матеріалу зерна з домішкою ρ_1^0, ρ_2^0 , тобто $\rho_1^0, \rho_2^0 \gg \rho_3^0$, то впливом повітря на рух решти фаз можна знехтувати. Таки чином зернову масу можна розглядати як двофазну та дисперсну і застосувати до неї теорію багатофазних суцільних середовищ [11, 12].

Розглянемо динаміку суміші у відносному русі, коли переносний рух здійснюється обертовим рухом розкидача з постійною кутовою швидкістю (усталений рух, що відповідає робочому циклу роботи сепаратора). Внаслідок того, що суміш виконує складний рух, то до діючих зовнішніх сил необхідно додати сили інерції. Це сили інерції викликані переносним рухом та коріюлісова сила інерції, викликана коріюлісовим прискореннями внаслідок обертального переносного руху та ненульового відносного руху [13-15].

Для кожної з фаз відповідно до теорії суцільних середовищ мають місце рівняння збереження маси [9, 16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \text{div}(\rho_1 \vec{v}_1) &= 0; \\ \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \text{div}(\rho_2 \vec{v}_2) &= 0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

і рівняння руху [9, 16]:

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} + \vec{v}_1 \cdot \nabla \vec{v}_1 \right) &= \text{div} \hat{\sigma}_1 + \vec{f}_{12} + \rho_1 \vec{g} - \rho_1 \left[\vec{\Omega} (\vec{\Omega} \cdot \vec{r}) - \Omega^2 \vec{r} \right] - 2\rho_1 \vec{\Omega} \times \vec{v}_1; \\ \rho_2 \left(\frac{\partial \vec{v}_2}{\partial t} + \vec{v}_2 \cdot \nabla \vec{v}_2 \right) &= \text{div} \hat{\sigma}_2 + \vec{f}_{21} + \rho_2 \vec{g} - \rho_2 \left[\vec{\Omega} (\vec{\Omega} \cdot \vec{r}) - \Omega^2 \vec{r} \right] - 2\rho_2 \vec{\Omega} \times \vec{v}_2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

де: $\vec{v}_{1,2}$ – відносні швидкості фаз;

$\hat{\sigma}_{1,2}$ – тензори напружень фаз;

\vec{f}_{12} – сила, з якою фаза 1 (зернова) діє на фазу 2 (домішкову) і відповідно до третього закону Ньютона $\vec{f}_{12} = -\vec{f}_{21}$.

Насипна щільність домішок ρ_2 значно менше щільності зерна (натури) ρ_1 ($\rho_2 \ll \rho_1$) і число частинок домішок n_2 менше числа частинок зерна n_1 в одиниці об'єму [17-19]. Внаслідок цих фактів можна вважати, що частинки домішкової фази між собою не взаємодіють (чи їх взаємодією в цій задачі можна знехтувати), і її тензор напружень тотожно дорівнює нулю $\hat{\sigma}_2 \equiv 0$. Сила ж взаємодії фаз між собою являє силу в'язкої взаємодії Стокса [20-22]:

$$\vec{f}_{21} = \vec{f}_c = 6\pi\mu_1 a_2 n_2 (\vec{v}_1 - \vec{v}_2), \quad (2.3)$$

де μ_1 – динамічний коефіцієнт зсувної в'язкості суміші;

a_2 – еквівалентний радіус частинки домішки (для частинок, що мають сферичну форму, a_2 збігається з радіусом сфери, для частинок, що апроксимуються еліпсоїдом обертання $a_2 = 0,5 \cdot \sqrt[3]{l \cdot b \cdot h}$, де l, b, h довжина, ширина і висота частинки відповідно) [23-26].

Введемо поняття об'ємної щільності для фаз $\varepsilon_{1,2}$, рівну відношенню об'єму $V_{1,2}^c$ частинок фази, що розташовуються в деякому обсязі простору $V_{1,2}^\phi$, до цього об'єму:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{V_{1,2}^c}{V_{1,2}^\phi}. \quad (2.4)$$

Мають місце очевидні співвідношення:

$$\rho_1 = \varepsilon_1 \rho_1^0, \quad \rho_2 = \varepsilon_2 \rho_2^0 \quad (2.5)$$

і враховуючи, що об'єм сфери $V = \frac{4}{3} \pi a_{1,2}^3$ для концентрації часток маємо:

$$n_2 = \frac{3\rho_2}{\rho_2^0 4\pi a_2^3} = \frac{3\varepsilon_2}{4\pi a_2^3} \quad (2.6)$$

Справжня (дійсна) щільність матеріалу фаз в процесі руху не змінюється ($\rho_{1,2}^0 = const$) [27-29], тому позначенням $\varepsilon_{1,2}$ будемо користуватися для скорочення запису. Тоді, з урахуванням сказаного вище, рівняння (2.1) і (2.2) можна представити у вигляді:

$$\frac{\partial \rho_{1,2}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{1,2} \bar{v}_{1,2}) = 0, \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} & \rho_1 \left(\frac{\partial \bar{v}_1}{\partial t} + \bar{v}_1 \cdot \nabla \bar{v}_1 \right) = \\ & = \text{div} \hat{\sigma}_1 - \frac{9\mu_1 \rho_2}{2a_2^2 \rho_2^0} (\bar{v}_1 - \bar{v}_2) + \rho_1 \bar{g} - \rho_1 \left[\bar{\Omega} (\bar{\Omega} \cdot \bar{r}) - \Omega^2 \bar{r} \right] - 2\rho_1 \bar{\Omega} \times \bar{v}_1, \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} & \rho_2 \left(\frac{\partial \bar{v}_2}{\partial t} + \bar{v}_2 \cdot \nabla \bar{v}_2 \right) = \\ & = \frac{9\mu_1 \rho_2}{2a_2^2 \rho_2^0} (\bar{v}_1 - \bar{v}_2) + \rho_2 \bar{g} - \rho_2 \left[\bar{\Omega} (\bar{\Omega} \cdot \bar{r}) - \Omega^2 \bar{r} \right] - 2\rho_2 \bar{\Omega} \times \bar{v}_2. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Так як щільність та концентрація частинок домішкової фази набагато нижча ніж зернової, то застосуємо гіпотезу про слабкий вплив руху домішок на рух зернової фази. Тоді в рівнянні (2.8) в правій частині можна відкинути другий доданок $\frac{9\mu_1 \rho_2}{2a_2^2 \rho_2^0} (\bar{v}_1 - \bar{v}_2)$, що визначає вплив частинок домішкової фази на зернову, а рівняння записати у спрощеному вигляді:

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\partial \vec{v}_1}{\partial t} + \vec{v}_1 \cdot \nabla \vec{v}_1 \right) = \\ = \operatorname{div} \hat{\sigma}_1 + \rho_1 \vec{g} - \rho_1 \left[\vec{\Omega} (\vec{\Omega} \cdot \vec{r}) - \Omega^2 \vec{r} \right] - 2\rho_1 \vec{\Omega} \times \vec{v}_1. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Рух суміші по тарілчастому розкидачу (поверхня S_2) обмежена поверхнями S_1, S_2, S_3, S_4 і півплощинами S_5, S_6 , що утворюють кут β_1 (рис. 2.4, 2.5). Півплощини S_5, S_6 конструктивно являють собою ребра розкидача, що перешкоджають переміщенню середовища в трансверсальному напрямку.

Рух частинок нижнього шару по поверхні S_2 можна розглядати як рух невідільної точки по поверхні S_2 [30]:

$$\Phi(x, y, z, t) = 0. \quad (2.11)$$

А рух нижнього шару впливає на вище розташовані, а також на утворення вільної поверхні.

Введемо декартову (x, y, z) систему координат з початком в т. O та віссю Oz , спрямовану вертикально вниз (рис. 2.6). Поверхня S_2 утворена обертанням кривої $OABC$ навколо осі Oz на кут β_1 . Криву $OABC$ опишемо сплайном третього порядку [31-33] $z = Z(r)$, що проходить через точки півплощини $\varphi = \text{const}$: $O(0, 0)$, $A(d_1/2, h_1)$, $B(r_B, z_B)$, $C(D_1/2, -b)$.

Складемо рівняння кривої $OABC$ у вигляді функціональної залежності між r, z . Крива $OABC$ складається з дуги OAB , кола радіуса R_l і відрізка прямої BC , що створює кут α_1 з відрізком CO .

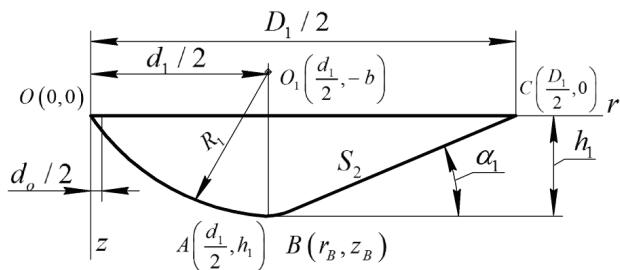


Рис. 2.6. До побудови поверхні тарілчастого розкидача, що описується сплайном третього порядку

З рис. 2.6 маємо:

$$R_1^2 = \left(\frac{d_1}{2}\right)^2 + b^2 = (h_1 + b)^2. \quad (2.12)$$

Із співвідношення (2.12) маємо:

$$b = \frac{1}{2h_1} \left(\frac{d_1^2}{4} - h_1 \right). \quad (2.13)$$

За своїм змістом b є позитивною величиною, а, отже, повинна виконуватись нерівність:

$$d_1 > 2\sqrt{h_1}. \quad (2.14)$$

Рівняння кола, що проходить через точки O та A і описує ліву частину розкидача та має центр в т. O_1 , має вигляд:

$$z^2 + \left(\frac{1}{4} \frac{d_1^2}{h_1} - h_1 \right) z + r^2 - d_1 r = 0. \quad (2.15)$$

Рівняння прямої BC представимо у вигляді:

$$z = k \left(\frac{D_1}{2} - r \right), \left(k = tg\alpha_1, r_B \leq r \leq \frac{D_1}{2} \right). \quad (2.16)$$

Звідки коефіцієнт k повинен задовольняти нерівності:

$$k = - \left. \frac{dz}{dr} \right|_{r=r_B, z=z_B}, \quad (2.17)$$

де похідна визначається для залежності $z = Z(r)$. Співвідношення (2.15) - (2.17) являють собою систему рівнянь для визначення трьох величин r_B, z_B, k .

Розв'язання цієї системи отримаємо у формі:

$$k = \frac{h_1}{2} \left(8d_1^2 D_1 + 32d_1 h_1^2 - 32h_1^2 D_1 - 8d_1^3 - \right. \\ \left. - 8\sqrt{-16d_1^3 h_1^2 D_1 - 32d_1 h_1^4 D_1 + d_1^4 D_1^2 - 2d_1^5 D_1 + 8d_1^2 D_1^2 h_1^2 + 16h_1^4 D_1^2} \right) \times \\ \times \left(32D_1 h_1^2 d_1 - 8d_1^2 h_1^2 + d_1^4 + 16h_1^4 - 16D_1^2 h_1^2 \right)^{-1}, \quad (2.18)$$

$$z_B = k \frac{4D_1 h_1 - kd_1^2 + 4kh_1^2 - 4d_1 h_1}{8h_1 (1 + k^2)}, \quad (2.19)$$

$$r_B = kz_B + k \left(\frac{d_1^2}{8h_1} - \frac{h_1}{2} \right) + \frac{d_1}{2}, \quad (2.20)$$

де: z_B, r_B – висота і радіус тарілчастого розкидача в т. B , до якої його поверхню описується дугою OBC , а далі – похилою прямою BC (рис. 2.7).

Для опису кривої $OABC$ скористаємося складеною формулою, що враховує співвідношення (2.14) - (2.20):

$$z = Z(r) = \begin{cases} \frac{-d_1^2 + 4h_1^2 + \sqrt{d_1^4 - 8d_1^2 h_1^2 + 16h_1^4 + 64d_1 r h_1^2 - 64r^2 h_1^2}}{8h_1}, & (0 \leq r \leq r_B), \\ k \left(\frac{D_1}{2} - r \right), & \left(r_B \leq r \leq \frac{D_1}{2} \right). \end{cases} \quad (2.21)$$

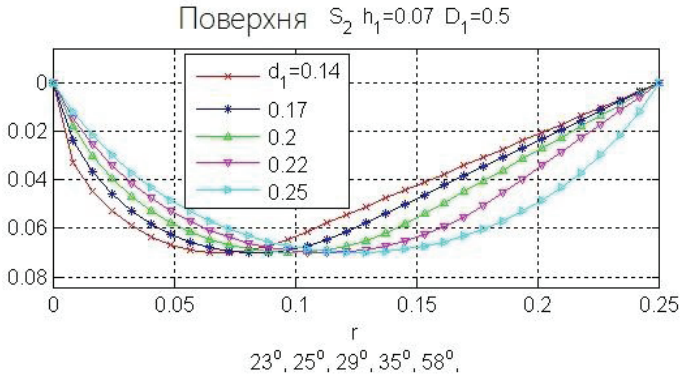


Рис. 2.7. Криві, що описують поверхню тарілчастого розкидача

На рис. 2.7 наведені криві O_1ABC , що описують поверхню S_2 , відповідно до формули (2.21) для $D_1 = 0,5\text{м}$, $h_1 = 0,07\text{м}$ при різних значеннях d_1 (за початок відліку прийнята т. O_1). Як видно, збільшення d_1 , а значить і радіусу R_1 кола A_1BC , зміщує т. B і "розкриває" поверхню S_2 до периферії розкидача. Внаслідок отримання різного виду поверхні S_2 маємо різні умови руху, а отже і різні умови сходу частинок з розкидача, що необхідно при обчисленні ефективності очистки від легких домішок, а також можливих умов травмування зерна.

Введемо циліндричну систему координат (r, φ, z) , з віссю Oz , що збігається з відповідною віссю декартової системи координат.

При параметричному завданні поверхні S_2 (рис. 2.8) координати її т. M визначаються двома значеннями параметрів (u^1, u^2) , а сама поверхня задається співвідношеннями [34, 35]:

$$\begin{aligned} \vec{r} &= \vec{R}_0(u^1, u^2) = \vec{R}_0(r, \varphi) = \\ &= (u^1 \cos(u^2), u^1 \sin(u^2), Z(u^1)) = (r \cos(\varphi), r \sin(\varphi), Z(r)), \end{aligned} \quad (2.22)$$

де: \vec{r} – радіус-вектор точки поверхні S_2 ;

$Z(r)$ – визначається співвідношенням (2.21), $u^1 \equiv r$, $u^2 \equiv \varphi$.

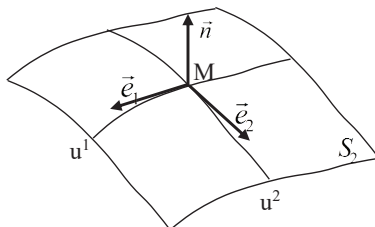


Рис. 2.9. До опису геометрії поверхні S_2 тарілчастого розкидача

Для побудови внутрішньої геометрії поверхні важливо знати першу A , другу B і третю C квадратичні форми поверхні S_2 [31-33], що застосовували в [6, 36]:

$$A = d\vec{R}_0 \cdot d\vec{R}_0 = \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial u^\alpha} \cdot \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial u^\beta} du^\alpha du^\beta = \vec{e}_\alpha \cdot \vec{e}_\beta du^\alpha du^\beta = a_{\alpha\beta} du^\alpha du^\beta, \quad (2.23)$$

$$B = -d\vec{R}_0 \cdot d\vec{n} = -\frac{\partial \vec{R}_0}{\partial u^\alpha} \cdot \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\beta} du^\alpha du^\beta = -\vec{e}_\alpha \cdot \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\beta} du^\alpha du^\beta = b_{\alpha\beta} du^\alpha du^\beta, \quad (2.24)$$

$$C = d\vec{n} \cdot d\vec{n} = \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\alpha} \cdot \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\beta} du^\alpha du^\beta = \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\alpha} \cdot \frac{\partial \vec{n}}{\partial u^\beta} du^\alpha du^\beta = c_{\alpha\beta} du^\alpha du^\beta, \quad (2.25)$$

де: \vec{n} – вектор одиничної нормалі до поверхні;

S_2 , $a_{\alpha\beta}$, $b_{\alpha\beta}$, $c_{\alpha\beta}$ – коефіцієнти першої, другої і третьої квадратичних форм поверхні (по повторюваним грецьким індексам мається на увазі

підсумовування від 1 до 2 (нотація Ейнштейна [37]).

Знайдемо коефіцієнти першої квадратичної форми А:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \vec{e}_1 &= \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial u^1} = (\cos(u^2), \sin(u^2), Z'_1) = (\cos(\varphi), \sin(\varphi), Z'_1), \\ \vec{e}_2 &= \frac{\partial \vec{R}_0}{\partial u^2} = (-u^1 \sin(u^2), u^1 \cos(u^2), Z'_2) = \\ &= (-u^1 \sin(u^2), u^1 \cos(u^2), 0) = (-r \sin(\varphi), r \cos(\varphi), 0), \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} a_{11} &= \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_1 = 1 + Z_1'^2, \\ a_{12} &= a_{21} = \vec{e}_1 \cdot \vec{e}_2 = 0, \\ a_{22} &= \vec{e}_2 \cdot \vec{e}_2 = (u^1)^2 = r^2, \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\left(\begin{array}{l} Z'_\alpha = \frac{\partial Z}{\partial u^\alpha}, \alpha = 1, 2, \\ Z'_1 = Z' = \frac{\partial Z}{\partial r} = \frac{dZ}{dr}, Z'_2 = \frac{\partial Z}{\partial \varphi} = 0 \end{array} \right). \quad (2.29)$$

Координатні лінії на S_2 представляють собою два сімейства кривих $u^1 \equiv r = const$ – кола та $u^2 \equiv \varphi = const$ – лінії $O_l ABC$, що лежать в напівплощинах $\varphi = const$. Матриця А виявляється діагональною. Це означає, що дана криволінійна система координат на поверхні S_2 є ортогональною, криві різних сімейств перетинаються під прямим кутом.

Одинична нормаль \vec{n} до S_2 визначається векторним добутком:

$$\vec{n} = \frac{\vec{e}_1 \times \vec{e}_2}{|\vec{e}_1 \times \vec{e}_2|} =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{1}{\left| \sqrt{1+Z'^2(u^1)} \right|} \left(-Z'(u^1) \cos(u^2), -Z'(u^1) \sin(u^2), 1 \right) = \\
&= \frac{1}{\left| \sqrt{1+Z'^2(r)} \right|} \left(-Z'(r) \cos(\varphi), -Z'(r) \sin(\varphi), 1 \right).
\end{aligned} \tag{2.30}$$

Тоді матриці другої і третьої квадратичних форм:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{pmatrix}, \tag{2.31}$$

$$C = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{pmatrix}, \tag{2.32}$$

Згідно до (2.31) та (2.32) будуть мати вигляд:

$$\begin{aligned}
b_{11} &= \frac{Z''}{\sqrt{1+Z'^2}}, \\
b_{12} &= b_{21} = 0, \\
b_{22} &= \frac{u^1 Z'}{\sqrt{1+Z'^2}} = \frac{r Z'}{\sqrt{1+Z'^2}}, \\
c_{11} &= \frac{Z''^2}{(1+Z'^2)^2}, \\
c_{12} &= c_{21} = 0, \\
c_{22} &= \frac{Z'^2}{1+Z'^2}.
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Введемо локальну криволінійну систему координат (x^1, x^2, x^3) (рис. 2.10). Координати просторової т. N визначимо наступним чином: з цієї точки опустимо перпендикуляр на поверхню S_2 . Основа цього перпендикуляра т. M лежить на поверхні S_2 і має координати $(u^1 = r, u^2 = \varphi)$. Через n позначимо відстань, що відраховується від т. M до т. N . Тоді $x^1 = u^1 = r, x^2 = u^2 = \varphi,$

$$x^3 = n.$$

Радіус-вектор \vec{r} т. N можна записати у вигляді:

$$\vec{r} = \vec{R}_0(u^1, u^2) + n\vec{n}(u^1, u^2). \quad (2.35)$$

Базисні вектори $(\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3)$ цієї системи координат визначаються співвідношеннями [38]:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_1(u^1, u^2, n) = \frac{\partial \vec{r}(u^1, u^2, n)}{\partial u^1} = \frac{\partial \vec{R}_0(u^1, u^2)}{\partial u^1} + n \frac{\partial \vec{n}(u^1, u^2)}{\partial u^1}, \quad (2.36)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{E}_2(u^1, u^2, n) = \frac{\partial \vec{r}(u^1, u^2, n)}{\partial u^2} = \frac{\partial \vec{R}_0(u^1, u^2)}{\partial u^2} + n \frac{\partial \vec{n}(u^1, u^2)}{\partial u^2}, \quad (2.37)$$

$$\vec{E}_3 = \vec{E}_3(u^1, u^2, n) = \frac{\partial \vec{r}(u^1, u^2, n)}{\partial n} = \vec{n}(u^1, u^2). \quad (2.38)$$

На рис. 2.10 представлено геометрію поверхні S_2 в локальній системі координат

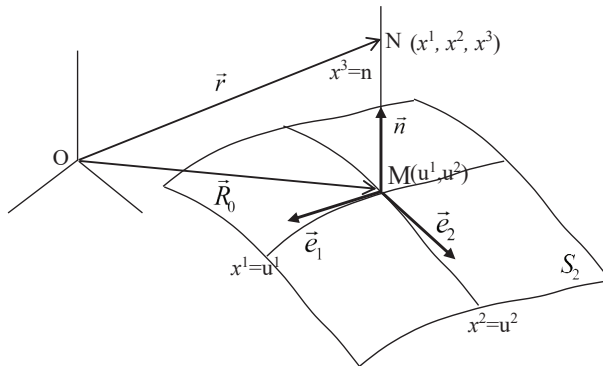


Рис. 2.10. До опису геометрії поверхні S_2 в локальній системі координат

Для запису диференціальних операцій при використанні криволінійних координат залучимо коваріаційне диференціювання [9, 39-41]. Коваріантна похідна використовує поняття метричного тензора \hat{g} – симетричного тензора другого рангу, що визначається матрицею $\|g_{ij}\|_{i,j=1}^3$, коефіцієнти якої виражаються через базисні вектори у вигляді $g_{i,j} = \vec{E}_i \cdot \vec{E}_j$. Згідно (2.36) - (2.38), компоненти зазначеного тензора мають вигляд:

$$\begin{aligned} g_{11} &= a_{11}(u^1, u^2) - 2n b_{11}(u^1, u^2) + n^2 c_{11}(u^1, u^2), \\ g_{12} = g_{21} &= a_{12}(u^1, u^2) - 2n b_{12}(u^1, u^2) + n^2 c_{12}(u^1, u^2), \\ g_{13} = g_{31} = g_{23} = g_{32} &= 0, \quad g_{33} = 1, \\ g_{22} &= a_{22}(u^1, u^2) - 2n b_{22}(u^1, u^2) + n^2 c_{22}(u^1, u^2). \end{aligned} \quad (2.39)$$

Двічі контраваріантні компоненти g_{ij} цього метричного тензора представляються матрицею, коефіцієнти якої збігаються з коефіцієнтами оберненої матриці:

$$\|g_{ij}\|_{i,j=1}^3 = \begin{pmatrix} \frac{g_{22}}{\det g} & -\frac{g_{21}}{\det g} & 0 \\ -\frac{g_{12}}{\det g} & \frac{g_{11}}{\det g} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \left(\det g = \begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & 0 \\ g_{21} & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \right). \quad (2.40)$$

Будь-який вектор може бути розкладений по довільному базису, зокрема, по базисних векторах $(\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3)$ [9]:

$$\vec{v} = v^i \vec{E}_i, \quad (2.41)$$

де: v^i уявляють собою контраваріантні компоненти вектору (по повторюваним латинським індексам підсумовування від 1 до 3). При диференціюванні вектору враховуємо те, що базисні вектори є змінними і залежать від криволінійних координат (x^1, x^2, x^3) :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial x^k} = \frac{\partial v^i}{\partial x^k} \vec{E}_i + v^i \frac{\partial \vec{E}_i}{\partial x^k}. \quad (2.42)$$

Вектори $\partial \vec{E}_i / \partial x^k$, в свою чергу, розкладемо по обраним базисних векторах:

$$\frac{\partial \vec{E}_i}{\partial x^k} = \Gamma_{ik}^j \vec{E}_j. \quad (2.43)$$

Коефіцієнти даного розкладання Γ_{ik}^j називають символами Крістоффеля другого роду, і визначаються вони через компоненти метричного тензора за допомогою співвідношень [9, 42]:

$$\Gamma_{ik}^j = \frac{1}{2} g^{jm} \left(\frac{\partial g_{mi}}{\partial x^k} + \frac{\partial g_{mk}}{\partial x^i} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x^m} \right), \quad (2.44)$$

$(i, j, k, m = 1, 2, 3).$

Об'єднуючи співвідношення (2.42), (2.43) і змінюючи назви «німих» (повторюваних) індексів, отримуємо:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial x^k} = \frac{\partial v^i}{\partial x^k} \vec{E}_i + v^i \Gamma_{ik}^j \vec{E}_j = \left(\frac{\partial v^i}{\partial x^k} + \Gamma_{jk}^i v^j \right) \vec{E}_i, \quad (2.45)$$

де співмножник при базисному векторі \vec{E}_i уявляють собою коваріантну похідну контраваріантного вектора по змінній x^k і позначається як:

$$v^i_{,k} = \frac{\partial v^i}{\partial x^k} + \Gamma_{jk}^i v^j. \quad (2.46)$$

Залучимо коваріантну похідну тензора напружень σ^{ij} як двічі контраваріантного тензора другого рангу. Коваріантна похідна такого тензора має вигляд [40]:

$$\sigma_{,k}^{ij} = \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x^k} + \Gamma_{mk}^i \sigma^{mj} + \Gamma_{mk}^j \sigma^{im}. \quad (2.47)$$

У рівняння руху (2.8, 2.9) входять вирази $\vec{v} \cdot \nabla \vec{v}$ та $div \hat{\sigma}$, які в координатній формі можна записати у вигляді контраваріантних векторів $\vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = v^i v_{,i}^j \vec{E}_j$ та $div \hat{\sigma} = \vec{E}_j \sigma_{,i}^{ij}$. Використовуючи коваріантне диференціювання, ці вектори запишемо у формі:

$$\begin{aligned} v^i v_{,i}^j &= v^i \left(\frac{\partial v^j}{\partial x^i} + \Gamma_{ik}^j v^k \right), \\ (div \hat{\sigma})^j &= \frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial x^i} + \Gamma_{ik}^i \sigma^{kj} + \Gamma_{ik}^j \sigma^{ki}. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Згідно співвідношенням (2.39)-(2.41) отримуємо вирази для ненульових значень символів Крістоффеля другого роду:

$$\begin{aligned} \Gamma_{11}^1 &= \frac{(a_{22} - 2nb_{22} + n^2c_{22}) \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial u^1} - 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^1} + n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^1} \right)}{2 \det g} \\ &- \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})}{2 \det g} \left(2 \frac{\partial a_{12}}{\partial u^1} - 4n \frac{\partial b_{12}}{\partial u^1} + 2n^2 \frac{\partial c_{12}}{\partial u^1} - \frac{\partial a_{11}}{\partial u^2} + 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^2} - n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^2} \right), \\ \Gamma_{12}^1 &= \Gamma_{21}^1 = \frac{(a_{22} - 2nb_{22} + n^2c_{22}) \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial u^2} - 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^2} + n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^2} \right)}{2 \det g} \\ &- \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12}) \left(\frac{\partial a_{22}}{\partial u^1} - 2n \frac{\partial b_{22}}{\partial u^1} + n^2 \frac{\partial c_{22}}{\partial u^1} \right)}{2 \det g}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$(2.50)$$

$$\Gamma_{13}^1 = \Gamma_{31}^1 = \frac{(a_{22} - 2nb_{22} + n^2c_{22})(-2b_{11} + 2nc_{11})}{2 \det g} - \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})(-2b_{12} + 2nc_{12})}{2 \det g}, \quad (2.51)$$

$$\Gamma_{22}^1 = \frac{(a_{22} - 2nb_{22} + n^2c_{22})}{2 \det g} \times \left(2 \frac{\partial a_{12}}{\partial u^2} - 4n \frac{\partial b_{12}}{\partial u^2} + 2n^2 \frac{\partial c_{12}}{\partial u^2} - \frac{\partial a_{22}}{\partial u^1} + 2n \frac{\partial b_{22}}{\partial u^1} - n^2 \frac{\partial c_{22}}{\partial u^1} \right) - \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12}) \left(\frac{\partial a_{22}}{\partial u^2} - 2n \frac{\partial b_{22}}{\partial u^2} + n^2 \frac{\partial c_{22}}{\partial u^2} \right)}{2 \det g}, \quad (2.52)$$

$$\Gamma_{23}^1 = \Gamma_{32}^1 = \frac{(a_{22} - 2nb_{22} + n^2c_{22})(-2b_{12} + 2nc_{12})}{2 \det g} - \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})(-2b_{22} + 2nc_{22})}{2 \det g}, \quad (2.53)$$

$$\Gamma_{11}^2 = - \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12}) \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial u^1} - 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^1} + n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^1} \right)}{2 \det g} + \frac{(a_{11} - 2nb_{11} + n^2c_{11})}{2 \det g} \times \left(2 \frac{\partial a_{12}}{\partial u^1} - 4n \frac{\partial b_{12}}{\partial u^1} + 2n^2 \frac{\partial c_{12}}{\partial u^1} - \frac{\partial a_{11}}{\partial u^2} + 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^2} - n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^2} \right), \quad (2.54)$$

$$\Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = - \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12}) \left(\frac{\partial a_{11}}{\partial u^2} - 2n \frac{\partial b_{11}}{\partial u^2} + n^2 \frac{\partial c_{11}}{\partial u^2} \right)}{2 \det g} + \frac{(a_{11} - 2nb_{11} + n^2c_{11}) \left(\frac{\partial a_{22}}{\partial u^1} - 2n \frac{\partial b_{22}}{\partial u^1} + n^2 \frac{\partial c_{22}}{\partial u^1} \right)}{2 \det g}, \quad (2.55)$$

$$\Gamma_{13}^2 = \Gamma_{31}^2 = -\frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})(-2b_{11} + 2nc_{11})}{2 \det g} + \frac{(a_{11} - 2nb_{11} + n^2c_{11})(-2b_{12} + 2nc_{12})}{2 \det g}, \quad (2.56)$$

$$\Gamma_{22}^2 = -\frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})}{2 \det g} \times \left(2\frac{\partial a_{12}}{\partial u^2} - 4n\frac{\partial b_{12}}{\partial u^2} + 2n^2\frac{\partial c_{12}}{\partial u^2} - \frac{\partial a_{22}}{\partial u^1} + 2n\frac{\partial b_{22}}{\partial u^1} - n^2\frac{\partial c_{22}}{\partial u^1} \right) + \frac{(a_{11} - 2nb_{11} + n^2c_{11})\left(\frac{\partial a_{22}}{\partial u^2} - 2n\frac{\partial b_{22}}{\partial u^2} + n^2\frac{\partial c_{22}}{\partial u^2}\right)}{2 \det g}, \quad (2.57)$$

$$\Gamma_{23}^2 = \Gamma_{32}^2 = \frac{(a_{12} - 2nb_{12} + n^2c_{12})(2b_{12} - 2nc_{12})}{2 \det g} - \frac{(a_{11} - 2nb_{11} + n^2c_{11})(2b_{22} - 2nc_{22})}{2 \det g}, \quad (2.58)$$

$$\Gamma_{11}^3 = b_{11} - nc_{11}, \quad (2.59)$$

$$\Gamma_{12}^3 = \Gamma_{21}^3 = b_{12} - nc_{12}, \quad (2.60)$$

$$\Gamma_{22}^3 = b_{22} - nc_{22}, \quad (2.61)$$

$$\Gamma_{33}^1 = \Gamma_{33}^2 = \Gamma_{13}^3 = \Gamma_{23}^3 = \Gamma_{31}^3 = \Gamma_{32}^3 = \Gamma_{33}^3 = 0. \quad (2.62)$$

Тут $\det g$ є визначником матриці метричного тензора g :

$$\det g = (c_{11}c_{22} - c_{12}^2)n^4 - 2(b_{11}c_{22} + c_{11}b_{22} - 2b_{12}c_{12})n^3 + -2(b_{11}a_{22} + a_{11}b_{22} - 2a_{12}b_{12})n + a_{11}a_{22} - a_{12}^2. \quad (2.63)$$

Для скорочення подальших записів і позбавлення від радикалів введемо заміну:

$$Z'^2 + 1 = K^2 \quad (2.64)$$

Беручи до уваги конкретний вид завдання поверхні S_2 (2.22), отримаємо:

$$A = \begin{pmatrix} K^2 & 0 \\ 0 & r^2 \end{pmatrix}, \quad (2.65)$$

$$B = \begin{pmatrix} \frac{Z''}{K} & 0 \\ 0 & \frac{rZ'}{K} \end{pmatrix}, \quad (2.66)$$

$$C = \begin{pmatrix} \frac{Z''^2}{K^4} & 0 \\ 0 & \frac{Z'^2}{K^2} \end{pmatrix}, \quad (2.67)$$

$$g = \begin{pmatrix} Z'^2 + 1 - 2\frac{nZ''}{K} + \frac{n^2Z''^2}{K^4} & 0 & 0 \\ 0 & r^2 - 2\frac{nrZ'}{K} + \frac{n^2Z'(r)^2}{K^2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.68)$$

Ненульові символи Крістоффеля другого роду з урахуванням конкретного виду поверхні:

$$\Gamma_{11}^1 = -2\frac{Z''^3 n^2 Z'}{K^8} + \frac{nZ''^2 Z'}{K^5} + \frac{Z' Z''}{K^2}, \quad (2.69)$$

$$\Gamma_{13}^1 = \Gamma_{31}^1 = \frac{Z''^2 n}{K^6} - \frac{Z''}{K^3}, \quad (2.70)$$

$$\Gamma_{22}^1 = -\frac{Z' Z'' n^2}{K^6} + \frac{(Z'^3 + Z' + rZ'')n}{K^5} - \frac{r}{K^2}, \quad (2.71)$$

$$\Gamma_{12}^2 = \Gamma_{21}^2 = \frac{n^2 Z' Z''}{K^4 r^2} - \frac{(Z'^3 + Z' + rZ'')n}{K^3 r^2} + \frac{1}{r}, \quad (2.72)$$

$$\Gamma_{23}^2 = \Gamma_{32}^2 = \frac{r^2 Z'^2}{K^2} \left(-2 \frac{rZ'}{K} + 2 \frac{nZ'^2}{K^2} \right)^{-1}, \quad (2.73)$$

$$\Gamma_{11}^3 = \frac{Z''}{K} - \frac{nZ''^2}{K^4}, \quad (2.74)$$

$$\Gamma_{22}^3 = \frac{rZ'}{K} - \frac{nZ'^2}{K^2}. \quad (2.75)$$

Товщина шару двофазного середовища, що рухається по поверхні S_2 , мала в порівнянні з радіусом кривизни кривої O_1ABC . Тому доданки, що містять n у всіх виразах, представлених вище, є малими величинами. У теорії руху тонких шарів суцільного середовища виконуються співвідношення: $\partial v^i / \partial x^\alpha \ll \partial v^i / \partial n$, $|v^3| \ll |v^\alpha|$ ($\alpha = 1, 2$) [43]. Запишемо необхідні вирази з точністю до членів порядку $\sim O(n)$ в наближенні тонкого шару. Тоді контраваріантні вектори приймають вид:

$$\begin{aligned} (\tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}})^1 &= v^1 \frac{\partial v^1}{\partial r} + v^2 \frac{\partial v^1}{\partial \varphi} + \left[-\frac{(Z''Z'^2 - 3Z''^2Z' + Z''')n}{K^5} + \frac{Z'Z''}{K} \right] (v^1)^2 + \\ &+ \left[\frac{(Z'^3 + Z' - rZ'')n}{K^5} - \frac{r}{K^2} \right] (v^2)^2, \end{aligned} \quad (2.76)$$

$$(\tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}})^2 = v_1 \frac{\partial v^2}{\partial r} + v^2 \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + \left(2 \frac{(Z'^3 + Z' - rZ'')n}{K^3 r^2} + \frac{2}{r} \right) v^2 v^1, \quad (2.77)$$

$$(\tilde{\mathbf{v}} \cdot \nabla \tilde{\mathbf{v}})^3 = \left(-\frac{Z''^2 (v^1)^2}{K^4} - \frac{Z'^2 (v^2)^2}{K^4} \right) n + \frac{Z'' (v^1)^2}{K} + \frac{rZ' (v^2)^2}{K}, \quad (2.78)$$

$$\begin{aligned}
div(\hat{\sigma})^1 &= \frac{\partial}{\partial r} \sigma^{11} + \frac{\partial \sigma^{12}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma^{13}}{\partial n} + \\
&+ \left[\left(\frac{6Z''^2 Z'}{K^5} - \frac{Z''}{rK^3} - \frac{2Z'''}{K^3} + \frac{Z'}{r^2 K} \right) n + \frac{1}{r} + \frac{2Z'Z''}{K^2} \right] \sigma^{11} + \\
&+ \left[\left(-\frac{3Z''^2}{K^6} - \frac{Z'^2}{r^2 K^2} \right) n - \frac{3Z''}{K^3} - \frac{Z'}{rK} \right] \sigma^{13} + \\
&+ \left[\left(-\frac{rZ''}{K^5} + \frac{Z'}{K^3} \right) n - \frac{r}{K^2} \right] \sigma^{22},
\end{aligned} \tag{2.79}$$

$$\begin{aligned}
div(\hat{\sigma})^2 &= \frac{\partial \sigma^{12}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma^{22}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma^{23}}{\partial n} + \\
&+ \left[\left(\frac{3Z''^2 Z'}{K^5} - \frac{3Z''}{rK^3} - \frac{Z'''}{K^3} + \frac{3Z'}{r^2 K} \right) n + \frac{3}{r} + \frac{Z'Z''}{K^2} \right] \sigma^{12} + \\
&+ \left[\left(-\frac{3Z'^2}{r^2 K^2} - \frac{Z''^2}{K^6} \right) n - \frac{Z''}{K^3} - \frac{3Z'}{rK} \right] \sigma^{23},
\end{aligned} \tag{2.80}$$

$$\begin{aligned}
div(\hat{\sigma})^3 &= \frac{\partial \sigma^{13}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma^{23}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \sigma^{33}}{\partial n} + \left(\frac{Z''}{K} - \frac{Z''^2 n}{K^4} \right) \sigma^{11} + \\
&+ \left[\left(\frac{3Z''^2 Z'}{K^5} - \frac{Z''}{rK^3} - \frac{Z'''}{K^3} + \frac{Z'}{r^2 K} \right) n + \frac{Z'Z''}{K^2} + \frac{1}{r} \right] \sigma^{13} + \\
&+ \left(\frac{rZ'}{K} - \frac{Z'^2 n}{K^2} \right) \sigma^{22} + \left[\left(-\frac{Z'^2}{r^2 K^2} - \frac{Z''^2}{K^6} \right) n - \frac{Z'}{rK} - \frac{Z''}{K^3} \right] \sigma^{33}.
\end{aligned} \tag{2.81}$$

Рівняння нерозривності (2.1) містить операцію $div(\rho_1 \bar{v}_1)$. Запишемо вираз для цього оператора в обраній системі координат при зроблених припущеннях:

$$div(\rho_1 \bar{v}_1) = \frac{1}{rK} \frac{\partial}{\partial r} (rK \rho_1 v^1) + \frac{\partial \rho_1 v^2}{\partial \varphi} + \frac{\partial \rho_1 v^3}{\partial n}. \tag{2.82}$$

Реологічні співвідношення що пов'язують між собою напруги, градієнти швидкостей, щільність й інші величини багатозфазних середовищ типу сипучого матеріалу дуже різноманітні і мають неоднозначні співвідношення [9, 12, 22, 44-49]. Серед яких допусається й застосування гіпотези Нав'є-Стокса:

$$\sigma^{ik} = -(p + (v_1 - \frac{2}{3}\mu_1) \operatorname{div} \bar{v}) g^{ik} + \mu (g^{km} v_{,m}^i + g^{im} v_{,m}^k), \quad (2.83)$$

де: σ^{ik} – компоненти двічі контраваріантного тензора другого рангу;

g^{ik} – компоненти двічі контраваріантного метричного тензора;

p – тиск;

v_1 – коефіцієнт динамічної в'язкості при всебічному розширенні (стисканні).

Сформулюємо це співвідношення для зернового шару з урахуванням прийнятих припущень. У криволінійній системі координат (r, φ, n) компоненти цього тензора у відповідності до (2.46), (2.84) запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} \sigma^{11} = & \left(-2 \frac{Z''n}{K^5} - \frac{1}{K^2} \right) p + \\ & + \left(\left(2 \frac{(v_1 - 2/3\mu_1)Z''}{K^5} + \frac{2\mu_1 Z''}{K^5} \right) n + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{K^2} + \frac{\mu_1}{K^2} \right) \frac{\partial v^1}{\partial r} + \\ & + \left(2 \frac{(v_1 - 2/3\mu_1)Z''n}{K^5} + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{K^2} \right) \frac{\partial v^3}{\partial n} + \left(2 \frac{(v_1 - 2/3\mu_1)Z''n}{K^5} + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{K^2} \right) \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + \end{aligned} \quad (2.84)$$

$$\begin{aligned} & + \left\{ \left[2(v_1 - 2/3\mu_1) \left(\frac{Z'Z''}{K^2} + r^{-1} \right) \frac{Z''}{K^5} + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{(v_1 - 2/3\mu_1)}{K^2} \left(-\frac{Z''' + Z''Z'^2 - 3Z''^2Z'}{K^5} - \frac{Z''}{K^3 r} + \frac{Z'}{r^2 K} \right) \right] - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \left. \frac{\mu_1 K^5 (K^8 Z''' - 3Z''^2 Z' K^6) - \mu_1 K^{11} Z''^2 Z'}{K^{18}} \right] n + \\
& + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{K^2} \left(\frac{Z' Z''}{K^2} + \frac{1}{r} \right) + \frac{\mu_1 Z'' Z'}{K^4} \left. \right\} v^1, \\
\sigma^{12} &= \left(\frac{\mu_1 Z'' n}{K^5} + \frac{\mu_1}{K^2} \right) \frac{\partial v^2}{\partial r} + \\
& + \left[\frac{\left(2\mu_1 K^5 \left((Z'^3 + Z') (1 + Z'^2) \right) - (1 + Z'^2) r Z'' \right) + 2\mu_1 (1 + Z'^2)^{7/2} Z'' r}{r^2 K^{12}} \right] n + \quad (2.85) \\
& + \left. \frac{\mu_1}{K^2 r} \right] v^2,
\end{aligned}$$

$$\sigma^{13} = \left(-\frac{2\mu_1 Z''^3 n^2}{K^9} + \frac{\mu_1 Z''^2 n}{K^6} + \frac{\mu_1 Z''}{K^3} \right) v^1, \quad (2.86)$$

$$\begin{aligned}
\sigma^{22} &= -\left(\frac{1}{r^2} + \frac{2nZ'}{Kr^3} \right) p + \\
& + \left(\frac{2(v_1 - 2/3\mu_1)Z'n}{Kr^3} + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{r^2} \right) \frac{\partial v^1}{\partial r} + \left(\frac{2(v_1 - 2/3\mu_1)Z'n}{Kr^3} + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{r^2} \right) \frac{\partial v^3}{\partial n} + \\
& + \left(\left(\frac{2(v_1 - 2/3\mu_1)Z'}{Kr^3} + \frac{2\mu_1 Z'}{Kr^3} \right) n + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{r^2} + \frac{\mu_1}{r^2} \right) \frac{d v^2}{\partial \varphi} + \\
& + \left\{ -1/3 \frac{(3v_1 - 2\mu_1)Z'''}{K^3 r^2} + \frac{(3v_1 - 2\mu_1)Z'Z''^2}{K^5 r^2} + 1/3 \frac{(-3v_1 - \mu_1 + 6v_1 Z'^2 - 4\mu_1 Z'^2)Z''}{K^3 r^3} \right. + \\
& \left. \left. + \frac{Z'(3v_1 + \mu_1)}{Kr^4} \right] n + \frac{v_1 - 2/3\mu_1}{r^2} \left(\frac{Z'Z''}{K^2} + \frac{1}{r} \right) + \frac{\mu_1}{r^3} \right\} v^1, \quad (2.87)
\end{aligned}$$

$$\sigma^{23} = \mu_1 Z' \frac{rZ'^2 + nKZ' + r}{r^2 K^3}, \quad (2.88)$$

$$\begin{aligned} \sigma^{33} = & -p + (v_1 - 2/3\mu_1) \frac{\partial v^1}{\partial r} + (v_1 - 2/3\mu_1) \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + (v_1 + 1/3\mu_1) \frac{\partial v^3}{\partial n} + \\ & + \left[(v_1 - 2/3\mu_1) \left(-\frac{Z''' + Z''Z'^2 - 3Z''^2Z'}{K^5} - \frac{Z''}{K^3 r} + \frac{Z'}{r^2 K} \right) n + \right. \\ & \left. + (v_1 - 2/3\mu_1) \left(\frac{Z'Z''}{K^2} + \frac{1}{r} \right) \right] v^1, \end{aligned} \quad (2.89)$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{12}, \quad (2.90)$$

$$\sigma_{31} = \sigma_{13}, \quad (2.91)$$

$$\sigma_{32} = \sigma_{23}. \quad (2.92)$$

На твердій поверхні розкидача суміш зерна та домішки мають можливість тільки ковзати уздовж неї. Відповідно маємо умова непроникнення компонент суміші через поверхню S_2 [9], а відповідно гранична умова матиме вигляд:

$$\vec{v}_{1,2} \cdot \vec{n} = 0. \quad (2.93)$$

Крім цього, врахуємо дію сил тертя на стінці. Тут будемо розглядати, так звані, «швидкі рухи» сипучого середовища [50-52]. При такому рухові середовище відчуває опір тертя ковзання. При цьому дотична складова сили тертя задовольняє закону сухого тертя Кулона [49]:

$$T = f_e N \quad (2.94)$$

виражає її пропорційність нормальному тиску N з «зовнішнім» коефіцієнтом тертя f_e суміші об поверхню. Останнє співвідношення в механіці суцільного середовища можна записати через тензор напружень. Напруження \vec{p} на поверхні S_2 пов'язані з тензором напружень співвідношенням Коші [9]:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= p^j \bar{E}_j(r, \varphi, 0) = p^\alpha \bar{e}_\alpha + p^3 \bar{n} = \\ &= \bar{n} \cdot \hat{\sigma} = n_i \sigma^{ij} \bar{E}_j(r, \varphi, 0) = \sigma^{3\alpha} \bar{e}_\alpha + \sigma^{33} \bar{n}, \end{aligned} \quad (2.95)$$

$(n = 0).$

В рівнянні (2.95) при розкладанні вектора напружень по базису криволінійної системи координат, перший доданок відповідає дотичній складовій $p^\alpha \bar{e}_\alpha$ ($T = |p^\alpha \bar{e}_\alpha|$), а другий $p^3 \bar{n}$ ($N = |p^3|$) – нормальній (по повторюваним латинським індексам підсумовування від 1 до 3, а по грецьким від 1 до 2). Тоді зі співвідношення (2.95) отримуюємо рівність:

$$\left(\sigma^{3\alpha} \bar{e}_\alpha \cdot \sigma^{3\beta} \bar{e}_\beta \right)^{1/2} = \left(a_{\alpha\beta} \sigma^{3\alpha} \sigma^{3\beta} \right)^{1/2} = f_e |\sigma^{33}|, \quad (2.96)$$

яку, з урахуванням співвідношень вищенаведених залежностей, можна записати у вигляді:

$$\left[K^2 (\sigma^{31})^2 + r^2 (\sigma^{32})^2 \right]^{1/2} = f_e |\sigma^{33}|, \quad (n = 0). \quad (2.97)$$

У криволінійній системі координат (r, φ, n) будуюмо вільну поверхню S_1 (рис. 2.11), яку описуємо рівнянням:

$$h(t, r, \varphi) - n = 0. \quad (2.98)$$

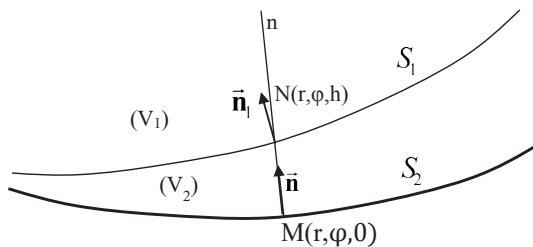


Рис. 2.11. До складання граничних умов та побудови вільної поверхні S_1

Продиференціюємо співвідношення (2.97) за часом:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{dr}{dt} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{d\varphi}{dt} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - \frac{dn}{dt} \frac{\partial h}{\partial t} \equiv \frac{\partial h}{\partial t} + V_{S_1}^1 \frac{\partial h}{\partial r} + V_{S_1}^2 \frac{\partial h}{\partial \varphi} - V_{S_1}^3 = 0. \quad (2.99)$$

Воно являє собою кінематичну умову на вільній поверхні S_1 . Ця умова містить контраваріантні компоненти вектора швидкості $\vec{V} = V_{S_1}^i(r, \varphi) \vec{E}_i(r, \varphi, h(t, r, \varphi))$ точок поверхні S_1 .

Так як завантаження тарілчастого розкидача, відповідно до будови сепаратора, відбувається згори, то ця суміш впливає на форму вільної поверхні. Задамо швидкості падаючого потоку зерна полем абсолютних швидкостей \vec{W}^a . Так як тарілчастий розкидач обертається зі сталою кутовою швидкістю $\vec{\Omega}$, то відносна швидкість зерна в зовнішньому потоці, відповідно до теореми додавання швидкостей, матиме вигляд $\vec{W} = \vec{W}^a - \vec{\Omega} \times \vec{r}$ [13, 30]. Введемо позначення $w_n = \vec{W} \cdot \vec{n}_1$, $v_n = \vec{V} \cdot \vec{n}_1$ – нормальні до поверхні S_1 складові швидкостей, \tilde{w} , \tilde{v} ; $\tilde{\rho}_1$ – щільність потоку зернової фази, що надходить на розкидач. Тут \vec{n}_1 – одинична нормаль до криволінійної поверхні S_1 (рис. 2.11):

$$\vec{n}_1 = \frac{\vec{E}_1 \times \vec{E}_2}{\left| \vec{E}_1 \times \vec{E}_2 \right|_{n=h(t,r,\varphi)}}. \quad (2.100)$$

Для однозначного визначення положення поверхні S_1 досить задавати нормальну складову вектора швидкості її точок: $\vec{V}_{S_1} = V_{S_1} \vec{n}_1$ [9, 53]. У цьому випадку рівняння (2.99) спрощується і приймає вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = V_{S_1}. \quad (2.101)$$

Друга гранична умова пов'язана з законом збереження маси [8, 9]:

$$\tilde{\rho}_1(w_n - V_{S_1}) = \rho_1(v_n - V_{S_1}), \quad (n = h). \quad (2.102)$$

Ще три умови випливають з умови збереження імпульсу при переході через S_1 [9, 49]. Ці умови, з урахуванням зроблених вище припущень, представимо у вигляді:

$$\tilde{\rho}_1(w^3 - V)^2 = \rho_1(v^3 - V_{S_1})^2 + \sigma^{33}, \quad (2.103)$$

$$\tilde{\rho}_1(w^3 - V)w^1 = \rho_1(v^3 - V_{S_1})v^1 + \sigma^{31}, \quad (2.104)$$

$$\tilde{\rho}_1(w^3 - V)w^2 = \rho_1(v^3 - V_{S_1})v^2 + \sigma^{32}. \quad (2.105)$$

Для спрощення розв'язку висунемо ряд гіпотез, що відповідають положенням теорії тонких шарів [43, 54, 55]: складову швидкості, перпендикулярну до S_2 вважатимемо малою в порівнянні з двома іншими компонентами; похідні компонент швидкості по нормалі істотно більших похідних від цих компонент по двох інших напрямках; глибина шару істотно менше характерного лінійного розміру, пов'язаного з поздовжнім напрямком по відношенню до S_2 (зокрема, менша її головних радіусів кривизни).

Враховуючі висунуті гіпотези, основну систему рівнянь представимо у формі:

– рівняння нерозривності:

$$\begin{aligned}
& v^1 \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho_1 \frac{\partial v^1}{\partial r} + v^3 \frac{\partial \rho_1}{\partial n} + \rho_1 \frac{\partial v^3}{\partial n} + v^2 \frac{\partial \rho_1}{\partial \varphi} + \rho_1 \frac{\partial v^2}{\partial \varphi} + \\
& + \left(\left(-\frac{Z''' + Z''Z'^2 - 3Z''^2Z'}{K^5} - \frac{Z''}{K^3 r} + \frac{Z'}{r^2 K} \right) n + \frac{Z'Z''}{K^2} + \frac{1}{r} \right) \rho_1 v^1 = 0,
\end{aligned} \tag{2.106}$$

– радіальна складова рівняння руху:

$$\frac{\partial^2 v^1}{\partial n^2} - A_1 \frac{\partial v^1}{\partial n} + B_1 v^1 + F_1 = 0, \tag{2.107}$$

де прийнято наступні позначення:

$$A_1 = A_1(r) = \left(-\frac{Z'^2}{r^2 K} - \frac{3Z''^2}{K^6} \right) n - \frac{3Z''}{K^3} - \frac{Z'}{rK}, \tag{2.108}$$

$$\begin{aligned}
B_1 = B_1(r) = & -\left\{ r \left[(v_1 + \mu_1 / 3) Z'^4 - 2Z'^3 Z'' r \mu_1 + (Z''^2 r^2 \mu_1 + 2v_1 + 2\mu_1 / 3) Z'^2 - \right. \right. \\
& \left. \left. - 2\mu_1 Z' Z'' r + \mu_1 / 3 + v_1 - Z''^2 r^2 \mu_1 \right] K^{11} + \left[7K^8 Z''^3 (2Z'^2 - 1) n r^3 - \right. \right. \\
& \left. \left. - 5K^{10} Z''^2 Z' n r^2 - 2 / 3 K^{12} Z'' (3Z'^2 + 1) n r + 2 / 3 K^{14} Z' n \mu_1 + \right. \right. \\
& \left. \left. + \left[K^{12} Z'' n r + 2K^{14} Z' n \right] v_1 \right\} r^{-3} \mu_1^{-1} K^{-17};
\end{aligned} \tag{2.109}$$

$$F_1 = \left(-\frac{Z' \rho_1 r \Omega^2}{2K^2 \mu_1} + \frac{Z'^2 \rho_1 g}{4K^2 \mu_1} \right) n + \frac{\rho_1 r^2 \Omega^2}{4K \mu_1} - \frac{Z' \rho_1 r g}{4K \mu_1}; \tag{2.110}$$

– трансверсальна складова рівняння руху:

$$\frac{\partial^2 v^2}{\partial n^2} + \left(-\frac{Z''}{K^3} + \left(-\frac{Z''^2}{K^6} - \frac{2Z'^2}{r^2 K^2} \right) n - \frac{2Z'}{rK} \right) \frac{\partial v^2}{\partial n} = 0, \tag{2.111}$$

– нормальна складова рівняння руху:

$$\begin{aligned}
& (v_1 + \mu_1 / 3) \frac{\partial^2 v^3}{\partial n^2} + \left(-\frac{Z'' \mu_1}{K^3} - \frac{\mu_1 Z'}{rK} + \left(-\frac{Z''^2 \mu_1}{K^6} - \frac{\mu_1 Z'^2}{r^2 K^2} \right) n \right) \frac{\partial v^3}{\partial n} + \\
& + \left\{ \left(\frac{Z''^2 n}{K^4} - \frac{Z''}{K} \right) v^1 - \left(\frac{r Z'}{K} - \frac{Z'^2 n}{K^2} \right) (v^2)^2 + \right. \\
& + \left[\left(\frac{Z' Z'' r^2}{2K^3} + \frac{Z'^2 r}{K} \right) n - \frac{Z'}{2r^2} \right] \Omega v^2 + \\
& \left. + \left(\left(\frac{Z' Z'' r^2}{4K^3} + \frac{Z'^2 r}{2K} \right) n - \frac{r^2 Z'}{4} \right) \Omega^2 + \left(\left(\frac{Z' r}{4K^3} + \frac{Z'}{4K} \right) n - 1/4r \right) g \right\} \rho_1 = 0.
\end{aligned} \tag{2.112}$$

Для отримання замкнутої системи рівняння динаміки необхідно доповнити граничними умовами. Ці умови отримуємо зі співвідношень (2.93), (2.97), (2.101) - (2.105). У разі стаціонарного руху маємо $V_{S_1} = 0$, а також при $n = h$:

$$\left(\frac{Z'^3 + Z' + Z'' r}{K^2} h - rK \right) \rho v^3 + \left(\frac{Z'^3 + Z' + Z'' r}{K^3} h - r \right) \tilde{\rho}_1 w_z = 0, \tag{2.113}$$

$$\left(K^2 - \frac{2Z'' h}{K} \right) \mu_1 \frac{\partial v^1}{\partial n} = 0, \tag{2.114}$$

$$\left(r^2 - \frac{2Z' r h}{K} \right) \mu_1 \frac{\partial v^2}{\partial n} = 0, \tag{2.115}$$

$$\begin{aligned}
& \left[\left(\frac{Z'' r}{K^2} + Z' \right) h - rK \right] p + \\
& + \left[\frac{\mu_1 - 3v_1}{3K^2} r h Z'' - \left(\frac{\mu_1}{3} + v_1 \right) h Z' + (K \mu_1 / 3 + K v_1) r \right] \frac{\partial v^3}{\partial n} +
\end{aligned} \tag{2.116}$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\left(-\frac{4\mu_1 Z'}{3K^4} + \frac{2\nu_1 Z'}{K^4} \right) rhZ''^2 + \right. \\
& + \left. \left(\left(-\frac{2\mu_1 Z'}{3K} + \frac{\nu_1 Z'}{K} \right) r + \left(\frac{2(Z'^2 + 2)\mu_1}{3K^2} - \frac{(Z'^2 + 2)\nu_1}{K^2} \right) h \right) Z'' + \right. \\
& \left. + Z''' \frac{2\mu_1 - 3\nu_1}{3K^2} rh + K\nu_1 - \frac{2\mu_1}{3} K \right] v^1 = 0,
\end{aligned}$$

при $n = 0$ – умова (2.97), а також:

$$v^3(r, \varphi, 0) = 0. \quad (2.117)$$

Отриманих рівнянь недостатньо для визначення вільної поверхні, тому залучимо додаткове співвідношення, яке можна отримаємо з інтегрального рівняння балансу маси [56].

Виділимо елементарний геометричний (нерухомий) об'єм ΔV , обмежений поверхнями $S_1, S_2, S_{r_1} : r = const, S_{r_2} : r + \Delta r = const, S_{\varphi_1} : \varphi = const, S_{\varphi_2} : \varphi + \Delta\varphi = const$ (рис. 2.12). Баланс маси суміші в даному об'єму визначається її надходженням через поверхню ΔS_1 і притоком або відтоком через поверхні $S_{r_1}, S_{r_2}, S_{\varphi_1}, S_{\varphi_2}$. Маса суміші в об'ємі визначається інтегралом:

$$\Delta M = \int_{\Delta V} \rho_1(t, r, \varphi, n) dV = \int_r^{r+\Delta r} \int_{\varphi}^{\varphi+\Delta\varphi} \int_0^h(t, r, \varphi) \rho_1(t, r, \varphi, n) r^2 K dr d\varphi dn. \quad (2.118)$$

Приплив маси Q до об'єму V за одиницю часу визначається інтегралами по відповідним поверхням, що обмежує цей об'єм:

$$\begin{aligned}
Q = & - \int_{\Delta S_1} \tilde{\rho}_1 \tilde{w} \cdot \tilde{n}_1 dS + \int_{\Delta S_2} \rho_1 \tilde{v} \cdot \tilde{E}_1 dS - \int_{\Delta S_{r_1}} \rho_1 \tilde{v} \cdot \tilde{E}_1 dS + \\
& + \int_{\Delta S_{\varphi_2}} \rho_1 \tilde{v} \cdot \tilde{E}_2 dS - \int_{\Delta S_{\varphi_1}} \rho_1 \tilde{v} \cdot \tilde{E}_2 dS.
\end{aligned} \quad (2.119)$$

Рівняння балансу в загальному вигляді можна записати в такий спосіб:

$$\frac{d\Delta M}{dt} = Q. \quad (2.120)$$

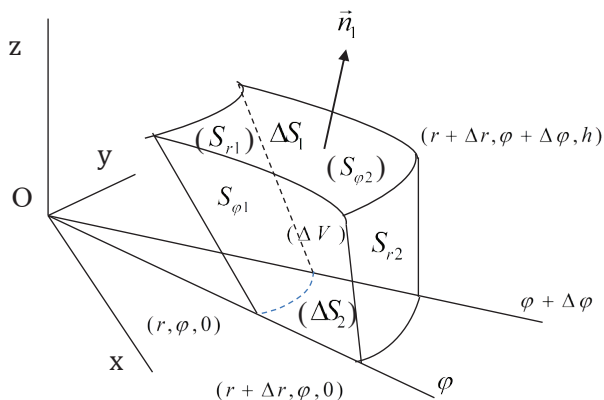


Рис. 2.12.. До складання інтегрального рівняння балансу маси суміші на тарілчастому розкидачу

У разі стаціонарного руху шару ліва частина рівняння (2.120) обертається в нуль. Скористаємося теоремою про повну загальну середню для інтегралів [57, 58]. Тоді, провівши перетворення, отримаємо в рамках наближення тонкого шару інтегро-диференціальне рівняння:

$$\int_0^h \rho_1 v^1 dn + r \int_0^h \frac{\partial \rho_1 v^1}{\partial r} dn + \frac{\partial h}{\partial \varphi} K \rho_1 v^2 \Big|_{n=h} + \int_0^h \frac{\partial \rho_1 v^2}{\partial \varphi} K dn = \frac{\tilde{\rho}_1 w_z}{K}. \quad (2.121)$$

Застосовуючи формулу диференціювання інтеграла по параметру, рівняння (2.121) перетворимо до виду:

$$\int_0^h \rho_1 v^1 dn + r \frac{\partial}{\partial r} \int_0^h \rho_1 v^1 dn - \rho_1 v^1 \Big|_{n=h} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_0^h \rho_1 v^2 K dn = \frac{\tilde{\rho}_1 w_z}{K}. \quad (2.122)$$

Диференціальні рівняння (2.106) - (2.112) можна розглядати як звичайні диференціальні рівняння, що містять в якості параметрів змінні r , φ . При фіксованих зазначених параметрів можна отримати однозначні рішення даних рівнянь при використанні граничних умов (2.113) - (2.117).

Після розв'язку попередньої задачі, використовуючи рівняння (2.122), визначаємо форму вільної поверхні S_I .

В силу малої щільності домішки вважаємо, що її частинки не взаємодіють між собою, що призводить до нуля її тензор напружень. Будемо розглядати домішку як потік частинок, що проникають зверху в зерновий шар і втягуються ним в рух. Дослідимо відносний рух частинок домішки. Для цього рівняння динаміки частинок запишемо в неінерціальній системи відліку. Таким чином, при русі частинки домішки в шарі по поверхні S_2 необхідно враховувати сили інерції, тяжіння, опору шару і силу тертя об тверду поверхню тарілчастого розкидача. З огляду на те, що канал, по якому рухається домішки з зерном, є досить вузьким, можна розглянути одномірний рух частинок вздовж лінії $O_I ABC$, що лежить на поверхні тарілчастого розкидача.

У векторній формі рівняння динаміки відносного руху матеріальної точки має вигляд:

$$m \frac{d\vec{v}_2}{dt} = -mg\vec{k} + N\vec{n}_1 - f_{mp} N\vec{\tau} - C_\mu (\vec{v}_2 - \vec{V}^{**}) - m \left[\vec{\Omega}(\vec{\Omega} \cdot \vec{r}) - \Omega^2 \vec{r} + 2\vec{\Omega} \times \vec{v}_2 \right], \quad (2.123)$$

де: \vec{k} – орт осі Oz ;

$m = \rho_2^0 \frac{4}{3} \pi a_2^3$ – маса частинки домішки;

$\vec{v}_2 = v_2 \vec{\tau}$ – вектор швидкості руху частинки домішки;

N – сила нормального тиску поверхні ротора на частку;

\vec{n}_1 – одинична нормаль до поверхні S_2 ;

f_{mp} – коефіцієнт тертя ковзання частинки об поверхню;

$\vec{\tau}$ нормального – одиничний вектор, дотичний до лінії O_1ABC ;

C_μ – коефіцієнт сили Стокса;

$\vec{V}^{**} = v_2 K \vec{\tau}$ – швидкість зернового потоку в точці, де знаходиться

частинка домішки.

Спроекуємо векторне рівняння (2.124) на три напрямки, які визначаються одиничними векторами $(\vec{\tau}, \vec{n}, \vec{j})$ (рис. 2.13):

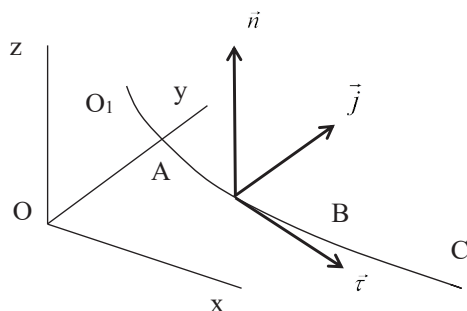


Рис. 2.13. До складання рівняння динаміки відносного руху домішок на тарілчастому розкидачу

$$\frac{dv_2}{dt} = -\frac{Z'g}{K} + \frac{\Omega^2 r}{K} - C_\mu (v_2 - v_2 K) - f_{mp} r N, \quad (2.124)$$

$$N = \sqrt{N_n^2 + N_b^2}, \quad (2.125)$$

$$\frac{v_2 Z''}{K^3} = N_n - \frac{g}{K} - \frac{Z' \Omega^2 r}{K} = 0, \quad (2.126)$$

$$N_b + \frac{2v_2\Omega}{K} - \frac{v_2 Z''}{K^3} = 0. \quad (2.127)$$

Рівняння (2.126), (2.127) слугують для визначення N_n, N_b як величин, що входять в рівняння (2.124). В якості початкової умови для (2.124) приймемо рівність нулю швидкості $v_2(0) = 0$. Це означає, що частка домішки проникає зверху в шар зерна з нульовою швидкістю в дотичному до O_1ABC напрямку. Точці її проникнення в шар відповідає значення параметра $r = r_0$, а точці сходу з розкидача $r = D_1 / 2$. Для розрахунків, пов'язаних з визначенням розв'язку (2.124), зручніше перейти до іншої незалежної змінної r , скориставшись перетворенням:

$$\frac{dv_2}{dt} = \frac{dv_2}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{dv_2}{dr} \frac{v_2}{K}. \quad (2.128)$$

Тоді рівняння (2.124) переходить в співвідношення:

$$\frac{dv_2}{dr} = \left[\frac{\Omega^2 r}{K} - \frac{Z' g}{K} - C_\mu (v_2 - v_2 K) - f_{mp} r N \right] \frac{K}{v_2}. \quad (2.129)$$

Отримані рівняння розв'яжемо чисельно. Обчислення проводимо для наступних даних, зазначених у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Вихідні дані для чисельного розв'язку

$d_0, \text{м}$	$d_1, \text{м}$	$D_1, \text{м}$	$h, \text{м}$	$w_z, \text{м/с}$	$\Omega, \text{с}^{-1}$	$\rho_1, \text{кг/м}^3$	$\rho_2, \text{кг/м}^3$
0,08	0,2	0,5	0,04	2	6,2-21,2	750	300

Зі збільшенням кутової швидкості тарілчастого розкидача від $6,2 \text{ c}^{-1}$ до $21,2 \text{ c}^{-1}$ (рис. 2.14) швидкість сходу зернових частинок збільшується в 12 разів, з $6,7$ до 24 м/с . Збільшення горизонтальної складової швидкості зернівок збільшує кількість травмованого зерна [59]. Особливо проявляється це ефект при збільшенні вологості [60, 61]. При значних кутових швидкостях тарілчастого розкидача швидкість сходу частинок значна і необхідно контролювати травмування зерна. Це накладає обмеження на конструкцію і кінематичні параметри розкидача. З конструктивних міркувань і, ґрунтуючись на даних розрахунків, у реальній конструкції встановлена кутова швидкість $11,2 \text{ c}^{-1}$. Прийемо цю кутову швидкість базовою для наступних розрахунків. Тоді при збільшенні кутової швидкості з $11,2$ до $21,2 \text{ c}^{-1}$ швидкість сходу зернових частинок збільшується в $3,6$ рази з $6,7$ до 24 м/с . При зменшенні кутової швидкості з $11,2$ до $6,2 \text{ c}^{-1}$ швидкість сходу зменшується на 70% , з $6,7$ до 2 м/с .

Основною зерною культурою, очищення якої проводиться сепаратором є пшениця, саме по ній розраховується продуктивність [4, 5]. Насипну щільність пшениці візьмемо в якості базової [62]. Для більш якісного зерна характерне більше значення насипної щільності (натури). Для інших культур характерне інше значення насипної щільності. Дослідимо як впливає її зміна на швидкість зернових частинок. На рис. 2.15 представлені залежності розподілу швидкостей зернових частинок вздовж каналу тарілчастого розкидача в залежності від насипної щільності оброблюваної культури (несучої зернової фази). Визначимо як змінюється швидкість сходу зернових частинок (швидкість V_1 на радіусі розкидача $r = 0,25 \text{ м}$), як видно з рис. 2.15, зі зменшенням насипної щільності від 750 до 600 кг/м^3 швидкість сходу зменшується на 22% , з $6,7$ до $5,2 \text{ м/с}$.

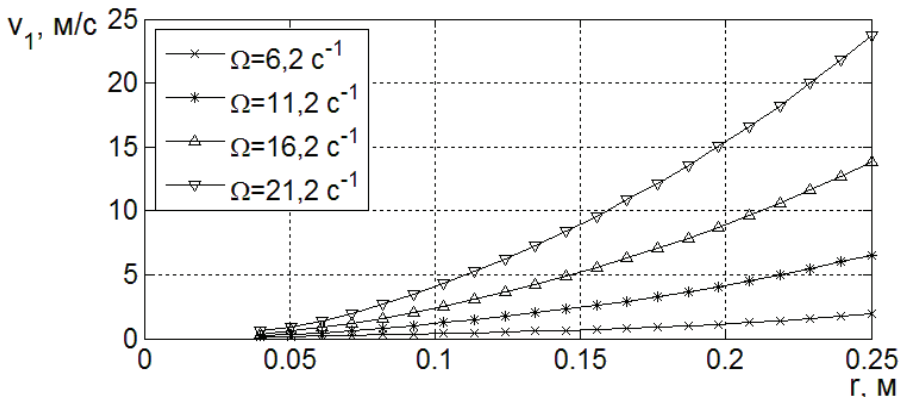


Рис. 2.14. Розподіли швидкостей зернових частинок пшениці уздовж тарілкового розкидача в залежності від його кутової швидкості ($\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$)

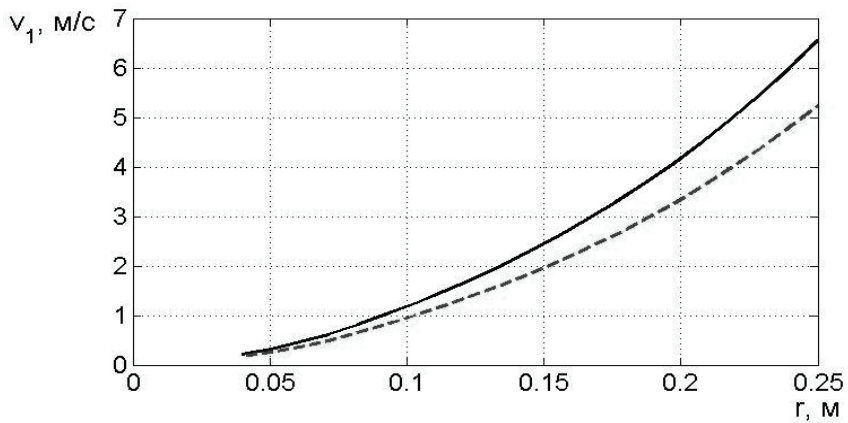


Рис. 2.15. Розподіли швидкостей зернових частинок пшениці уздовж тарілкового розкидача в залежності від її насипної щільності: --- — $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$; — — $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$ ($\Omega = 6,2 \text{ c}^{-1}$)

Згідно з аналізом рис. 2.14, 2.15, і кінематичні параметри тарілчастого розкидача, і фізико-механічні властивості зернової суміші з домішками істотно впливають на швидкість сходу зернових частинок. Проаналізуємо вплив діаметра тарілчастого розкидача як одного з визначальних конструктивних параметрів. Як видно з рис. 2.16, зі збільшенням діаметра ТР з 0,5 до 0,6 м, швидкість сходу зернових частинок збільшується в 1,5 разів, з 6,7 до 9,8 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – зменшується на 43 %, з 6,7 до 3,8 м/с.

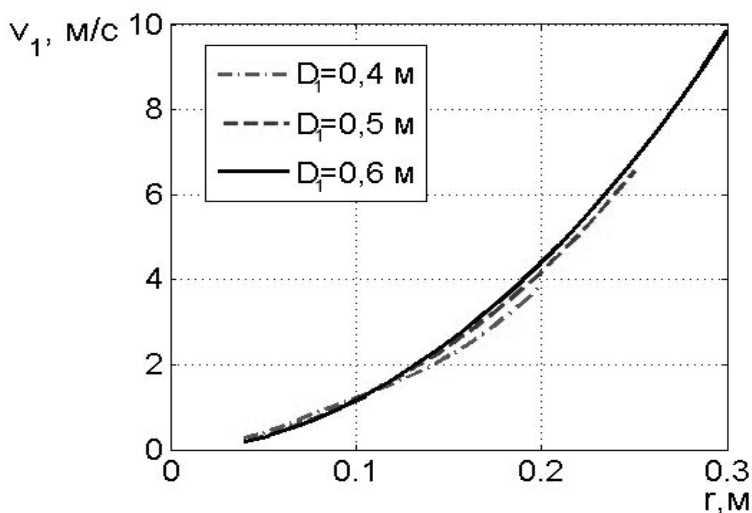


Рис. 2.16. Залежності швидкостей сходу частинок домішки від місця їх надходження на тарілчастий розкидач в залежності від його діаметра ($\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$, $\Omega = 6,2 \text{ с}^{-1}$)

Таким чином, зміна всіх зазначених параметрів впливає на швидкість сходу зернових частинок істотно, особливо кутової швидкості та діаметра тарілчастого розкидача. Але необхідно враховувати, що розміри та кутова швидкість впливають на габарити решітного блока, а його параметри повинні відповідати

оптимальному коефіцієнту відцентровості [2, 63-66].

Легкі домішки є дисперсною фазою суміші. Вона визначає швидкість руху домішок по розкидачу. Розглянемо як змінюється швидкість сходу частинок домішок в залежності від їх місця потрапляння на розкидач і його діаметра.

Як видно з рис. 2.17, залежності швидкостей сходу частинок домішок, в обраному масштабі, незначно відрізняються від прямих ліній. Вигин залежностей, що спостерігається для частинок, що потрапили близько до периферії розкидача, відповідно до реальних умов конструкції пневмосепаруючого пристрою сепаратора – відсутня. Даними для частинок, що потрапили близько до периферії розкидача знехтуємо. Проаналізуємо як змінюється швидкість сходу частинок домішок в залежності від діаметра тарілчастого розкидача (рис.2.15) і як вони співвідносяться з відповідними швидкостями зернових частинок.

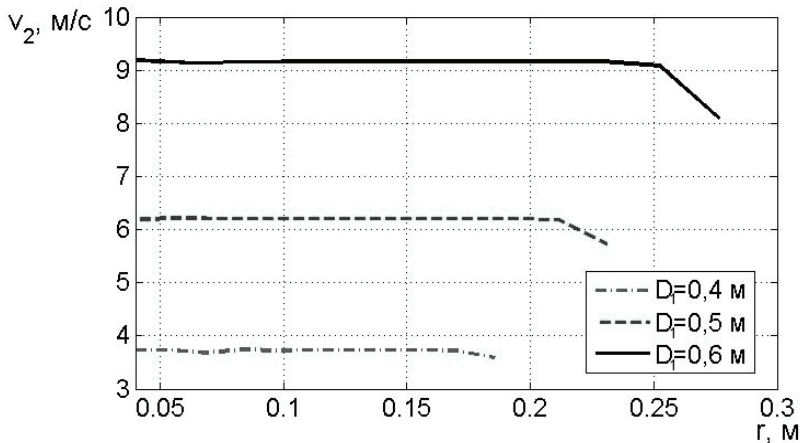


Рис. 2.17. Залежності швидкостей сходу частинок домішки від місця їх надходження на тарілчастий розкидач в залежності від його діаметра ($\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$, $\Omega = 6,2 \text{ с}^{-1}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$)

При збільшенні діаметра розкидача від 0,5 до 0,6 м швидкість сходу частинок домішок (рис. 2.17) збільшується в 1,5 разів, з 6,2 до 9,2 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – знижується на 40% до 3,7 м/с. Швидкості сходу частинок домішок при цьому становить 92-97% від відповідних швидкостей зернових частинок, а зміна діаметра розкидача впливає на них в рівній мірі. Вид вільної поверхні залежить як від кутової швидкості тарілчастого розкидача, так і від насипної щільності зернової фази (рис. 2.18). Збільшення шару зернової суміші (пагорб) спостерігається в зоні, прилеглий до осі обертання тарілчастого розкидача. Уздовж розкидача висота шару суміші монотонно спадає. Таким чином маємо, що дослідження виду вільної поверхні в залежності від діаметра розкидача не являє інтересу.

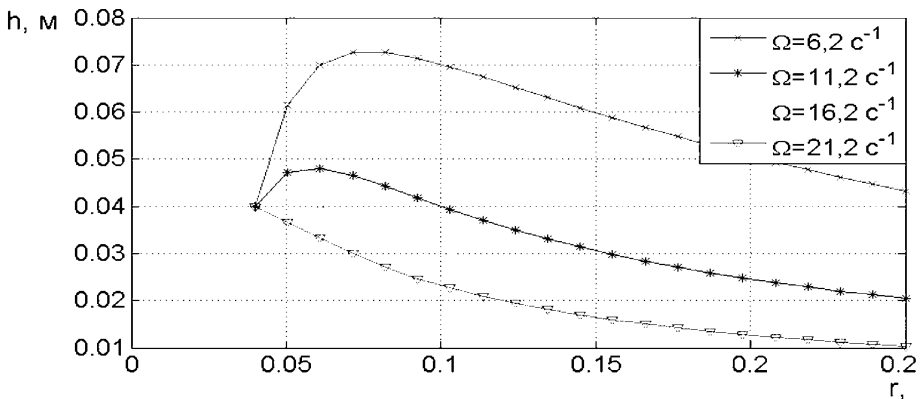


Рис. 2.18. Розподіли висот шару пшениці уздовж тарілчастого розкидача в залежності від кутової швидкості його обертання ($\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$)

Так як в якості базової кутової швидкості обрана $\Omega = 11,2 \text{ с}^{-1}$, зі зменшенням Ω до $6,2 \text{ с}^{-1}$ висота вільної поверхні збільшується в 1,5 рази, з 0,048 до 0,074 м. Висота шару суміші при сходженні з розкидача збільшується в 2,2

рази, з 0,02 до 0,044 м. Таким чином, приходимо до висновку, що зменшення кутової швидкості тарілчастого розкидача призводить до значного збільшення товщини шару зернової суміші, що негативно впливає на ефективність очистки.

Збільшення кутової швидкості до $16,2 \text{ c}^{-1}$ дозволяє позбутися від застійної зони (пагорба). З підвищенням Ω від $11,2$ до $21,2 \text{ c}^{-1}$, висота шару при сходженні з тарілчастого розкидача зменшується на 45%, з 0,02 до 0,011 м ($h_0 = 0,04$ м). З отриманих результатів маємо, що збільшення кутової швидкості істотно зменшує висоту шару при сходженні з тарілчастого розкидача. Однак слід враховувати, що зі збільшенням кутової швидкості значно зростає швидкість сходу зернових частинок, а це в свою чергу збільшує вірогідність травмування зерна.

При очищенні зернових культур різної насипної щільності, рис. 2.19, більш висока застійна зона спостерігається зі зменшенням ρ_1 . Так, зі зменшенням ρ_1 від 750 до 600 кг/м^3 , висота шару в застійній зоні збільшується на 12,5%, з 0,048 до 0,054 м, а висота шару при сходженні – на 20%, з 0,02 до 0,024 м.

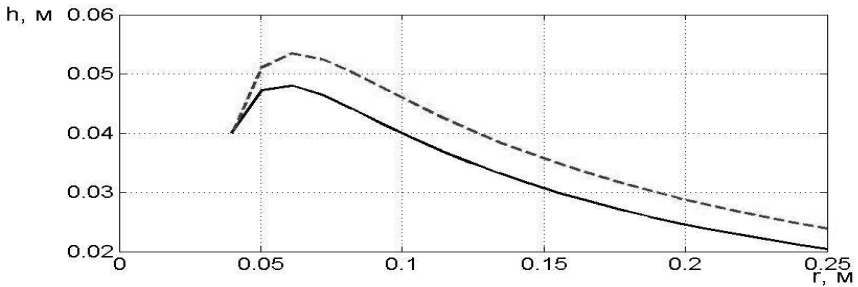


Рис. 2.19. Розподіли висот шару пшениці уздовж тарілчастого розкидача в залежності від насипної щільності зернової фази: - - - - $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$; — — — $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$ ($\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$)

Як видно з рис. 2.20, збільшення кутової швидкості тарілчастого розкидача істотно впливає на швидкість сходу частинок домішок. Розглянемо як вона змінюється для частинок домішок $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$ (вплив розмірів частинок і насипної щільності розглянемо далі). Так, зі збільшенням кутової швидкості розкидача від $11,2$ до $21,2 \text{ с}^{-1}$, швидкість сходу частинок збільшується в $2,8$ разів, з 7 до $19,5 \text{ м/с}$. Настільки високі швидкості легких домішок негативно позначаються на подальшому вилученні їх в основній кільцевій зоні очищення, швидкість повітряного потоку в якій становить $5-7 \text{ м/с}$, і значить частка може вилучатись вже лише в додаткових кільцевих зонах очищення. Зменшення кутової швидкості розкидача з $11,2$ до $6,2 \text{ с}^{-1}$ знижує швидкість сходу частинок домішок на 57% , з 7 до 3 м/с .

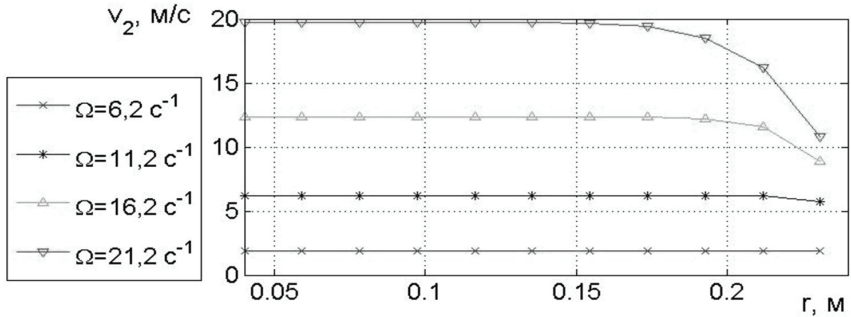


Рис. 2.20. Залежності швидкостей сходу частинок домішки від місця їх надходження на тарілчастий розкидач і кутової швидкості його обертання ($\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$)

Як сказано раніше, зернова фаза є несучою і її насипна щільність має суттєвий вплив на швидкість сходу частинок домішок. Так, при зменшенні насипної щільності зернової фази з 750 до 600 кг/м^3 (рис. 2.21), швидкість сходу

частинок домішок знижується на 18%, з 6,2 до 5,1 м/с. Звідси випливає, що крім інших факторів, на швидкість сходу частинок домішок впливає і культура, яку очищують.

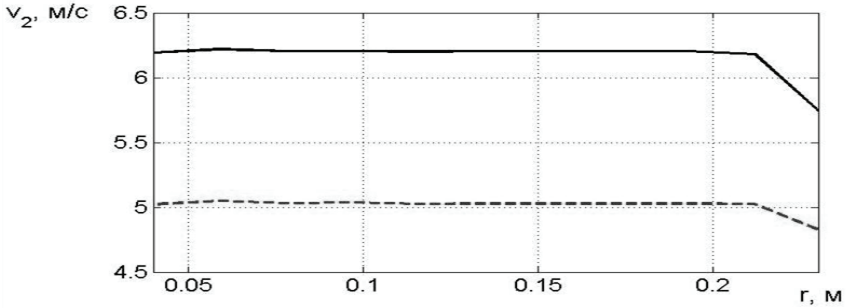
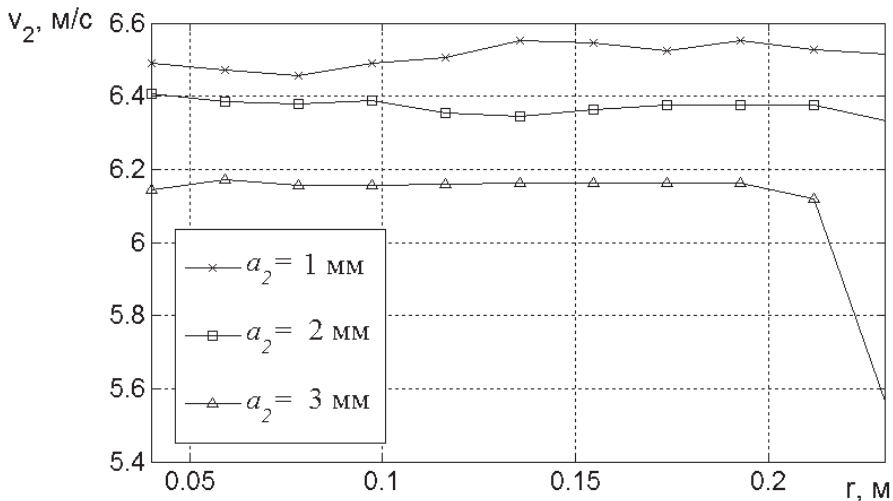


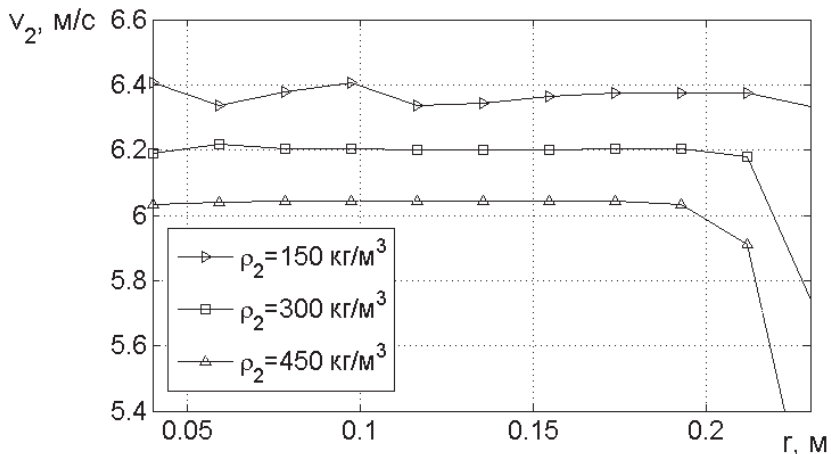
Рис. 2.21. Залежності швидкостей сходу частинок домішки від місця їх надходження на тарілчастий розкидач і насипної щільності культури, що оброблюється: - - - - $\rho_1 = 600 \text{ кг/м}^3$; — — — — $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$ ($\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\Omega = 11,2 \text{ с}^{-1}$)

Так як легкі домішки неоднорідні за своїми розмірами і насипний щільності, то оцінимо, як впливає зміна цих величин на швидкість сходу з розкидача.

Обмежимося розглядом частинок еквівалентний розмір яких складає 1-3 мм. Як видно з рис. 2.22,а, зі збільшенням розмірів частинок легких домішок від 1 до 3 мм їх середня швидкість сходу зменшується на 5%, з 6,5 до 6,15 м/с.



a)



б)

Рис. 2.22. Розподіли швидкостей сходу частинок домішок від місця їх надходження на тарілчастий розкидач в залежності від: а) розмірів частинок ($\rho_2 = 300$ кг/м³); б) насипної щільності домішкової фази ($a_2 = 0,002$ м)

Зміна насипної щільності також позначається на швидкості сходу незначно. Так, при збільшенні від 150 до 450 кг/м³, рис. 2.22,б, швидкість сходу частинок домішки в середньому зменшується на 6%, з 6,4 до 6 м/с.

Таким чином, хоч вплив кожного з факторів: розмірів і насипної щільності частинок, на величину швидкості їх сходу і незначний, але їх спільну дію необхідно враховувати.

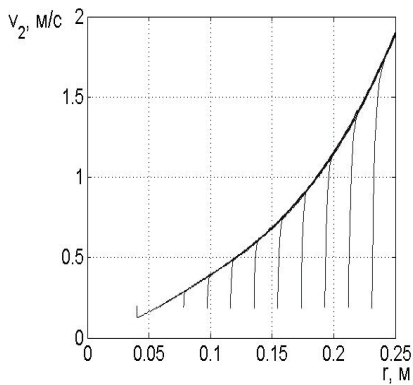
Як видно з рис. 2.23, швидкість часток легких домішок досить швидко набуває значення, яке визначається швидкістю потоку зернової суміші (як сказано раніше близько 92-97% від її швидкості). Причому при меншій швидкості тарілчастого розкидача, рис. 2.23,а, епюри швидкостей представляють практично вертикальні прямі, і з її підвищенням потрібно, щоб частка пройшла певний шлях.

Так, на рис. 2.23,в, частинці, що потрапила на $r = 0,1$ м, потрібно пройти 0,03 м, а частинці на $r = 0,15$ м – в 2,7 рази більшу відстань, тобто 0,08 м.

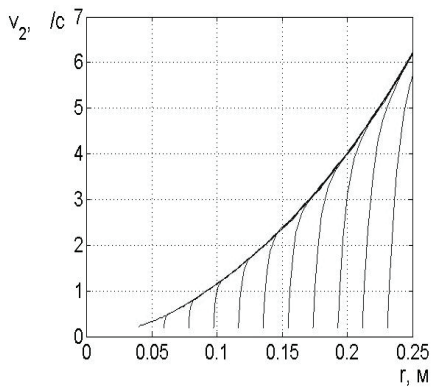
Епюра швидкості, що має від'ємні значення (рис. 2.23), вказує на те, що при малих значеннях кутової швидкості можливий рух зернової суміші і домішок до осі тарілчастого розкидача. Це пояснюється наявністю застійної зони при малих кутових швидкостях тарілчастого розкидача.

Узагальнюючи отримані результати, приходимо висновку, що швидкість сходу частинок легких домішок з розкидача залежить від конструктивних і кінематичних параметрів тарілчастого розкидача і від фізико-механічних властивостей зернової та домішкової фаз.

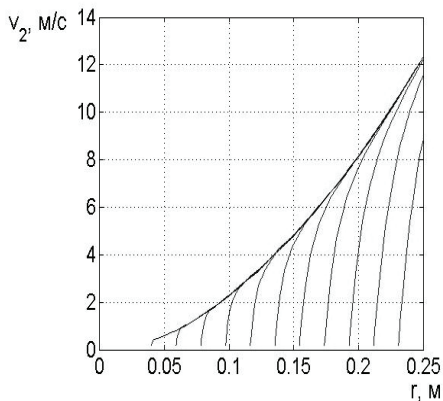
Значення отриманих швидкостей, використовуємо як початкові умови для вирішення задачі очищення зернової суміші в основній кільцевій зоні.



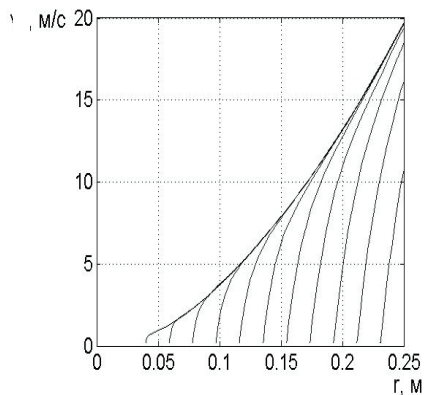
а)



б)



в)



г)

Рис. 2.23. Епюри швидкостей частинок домішок в залежності від їх місця надходження на тарілчастий розкидач: а) $\Omega = 6,2 \text{ c}^{-1}$; б) $\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$; в) $\Omega = 16,2 \text{ c}^{-1}$; г) $\Omega = 21,2 \text{ c}^{-1}$ ($\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$)

2.2. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ОСНОВНІЙ КІЛЬЦЕВІЙ ЗОНІ

Очищення від легких домішок в модернізованому пневмосепаруючому пристрої вібровідцентрового сепаратору відбувається в двох зонах: основній та додатковій (рис. 2.24). Робота пневмосепаруючого пристрою відбувається у нижченаведеній послідовності. Через завантажувальний патрубок 1 і клапан 2 суміш з домішками надходить на тарілчастий розкидувач 3. Внаслідок обертання розкидувача, відбувається рух суміші по ньому та потрапляння в основний кільцевий канал очистки. Так як частинки суміші сходять з ненульовими початковими швидкостями, то внаслідок продувки повітряним потоком відбувається інтенсивне розшарування на легкі домішки та основну культуру. Рух повітряного потоку відбувається за рахунок створення розрідження в пилоосаджувальній камері, що приєднується до виводного патрубку 8. Забір повітря відбувається через повітрязабірні вікна 4. Звідки потік повітря спрямовується через кільцеві щілини складеного каскадного конуса 6, таким чином маємо утворення трьох додаткових кільцевих зон продувки. Повітряний потік з домішками, вилученими в додатковій зоні очистки (продувки) спрямовується до основної кільцевої зони очистки. Основна зона очистки обмежена тарілчастим розкидачем 3 та діафрагмою 7. В тому випадку, якщо легкі домішки не були вилучені в кільцевому каналі між ними, то суміш потрапляє на скатний конус. Подальше вилучення легких домішок стає можливим в додатковій зоні очистки (в 3 додаткових кільцевих зонах). Вилучені легкі домішки спрямовуються до відповідного патрубку 8 і далі до пилоосаджувальної камери. А зернова фаза по каскадах конусу надходить на дисковий розкидувач 9 і далі в решітний блок 10 сепаратора.

Для дослідження процесу створімо математичну модель процесу руху зерна з домішкою в основній зоні очищення (рис. 2.25), для чого складемо розрахункову схему. На поверхню обертового ТР падає суміш зерна з домішкою, яка за рахунок сил інерції переміщається до периферії, і потім викидається з

певною швидкістю \vec{v}_{01} та \vec{v}_{02} в область (V) (ці дані отримали при вирішенні попередньої задачі). Рух повітряного потоку практично не залежить від динаміки частинок зерна і домішки, а визначається іншими факторами (геометрією зони, потужністю вентилятора та ін.). Будемо вважати рух повітряного потоку заданим. Він представляє собою однорідний потік, що рухається з постійною швидкістю \vec{w}_{III} , що спрямована під кутом β^* по відношенню до вертикалі.

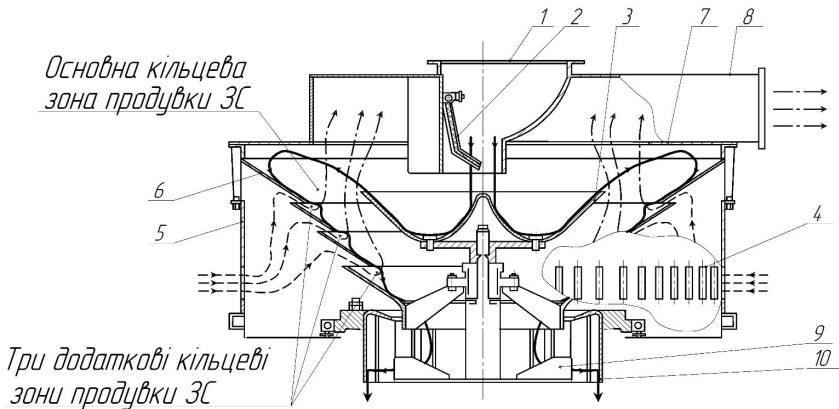


Рис. 2.24. Конструктивна схема розробленого віяло-кільцевого конусно-каскадного пневмосепаруючого пристрою:

1 – патрубок завантажувальний; 2 – клапан дозуючий; 3 – розкидач тарілчастий; 4 – вікна повітрязабірні, 5 – кожух сепаратора; 6 – конус каскадний складений; 7 – діафрагма; 8 – патрубок відвідний; 9 – розкидач дисковий; 10 – блок решітний; \longrightarrow – рух суміші зерна з домішками; $-\ - \blacktriangleright$ – повітряного потоку; $-\ \cdot \blacktriangleright$ – повітряного потоку з легкими домішками

Потоки зерна і домішки мають досить малу щільність. Тому можна знехтувати взаємодією частинок між собою. Тоді на рух частинок впливають тільки сили тяжіння і взаємодії їх з повітряним потоком за допомогою сили Стокса [12, 67, 68].

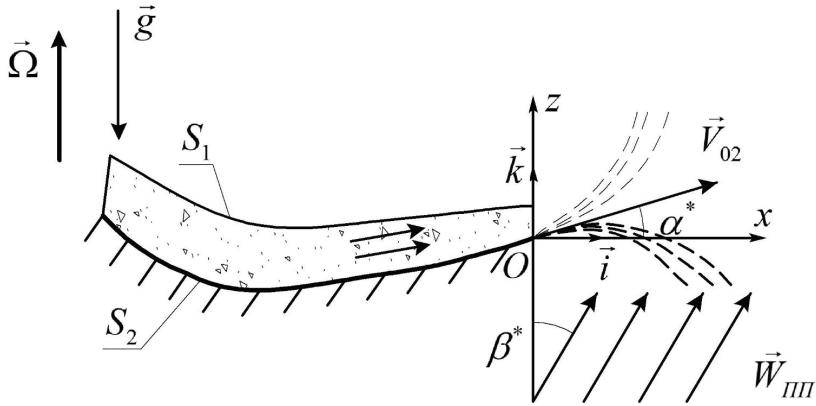


Рис. 2.25. Розрахункова схема руху потоку суміші в основній кільцевій зоні

Швидкості частинок зернової та домішкової фаз \vec{v}_{01} та \vec{v}_{02} маю як радіальну і вертикальну складові, так і ненульову трансверсальну складову. В основній зоні очистки нас цікавить вилучення частинок домішки, тому дослідимо розподіл її частинок в радіальному напрямку. Трансверсальна складова \vec{v}_{02} не впливає на цей розподіл. В якості початкової швидкості частинок домішкової фази візьмемо проекцію \vec{v}_{02} на площину xOz , залишаючи для неї те ж саме позначення.

На розрахунковій схемі застосуємо декартову систему координат (x, z) з ортами \vec{i}, \vec{k} (рис. 2.25). Рівняння динаміки частки домішки в векторній формі матиме вигляд [11]:

$$m \frac{d\vec{v}_2}{dt} = -mg\vec{k} - 6\pi\mu_3 a_2 (\vec{v}_2 - \vec{w}_{III}), \quad (2.130)$$

де: $m = \rho^0 \frac{4}{3} \pi a^3$ – маса частинки;

a_2 – радіус частинки (або «еквівалентний» радіус);

μ_3 – коефіцієнт динамічної в'язкості засміченого повітряного потоку;

$\vec{v}_2 = \dot{x}_2 \vec{i} + \dot{z}_2 \vec{k}$ – вектор швидкості руху частинки домішки;

$\vec{w}_{III} = w_{III} \sin \beta^* \vec{i} + w_{III} \cos \beta^* \vec{k}$ – швидкість повітряного потоку.

Визначення коефіцієнт динамічної в'язкості засміченого повітряного потоку проводили експериментально, відповідно до методики, наведеної в [69]. Для цього використовували лабораторну установку (рис. 2.26).



Рис. 2.26. Визначення коефіцієнту динамічної в'язкості засміченого повітряного потоку:

1 – лабораторна установка з прямокутними скатними пластинами; 2 – трансформатор; 3 – реостат повзунковий; 4 – USB-осцилограф; 5 – батареї акумуляторні; 6 – підсилювач; 7 – стійка; 8 – мостик діодний; 9 – балочка з тензодатчиком; 10 – бункер; 11 – ноутбук

Припустивши, що рух потоку робочим каналом є аналогічним до руху в'язкої рідини, за гіпотезою Ньютона для в'язких напружень, маємо [70, 71]:

$$\tau_e = \mu_3 \frac{\partial v}{\partial h}, \quad (2.131)$$

де: τ_e – дотичне напруження в'язкого тертя;
 h – глибина шару потоку;
 v – швидкість потоку на заданій глибині.

Звідси визначаємо ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості засміченого повітряного потоку:

$$\mu_3 = \tau_e \frac{\partial h}{\partial v}, \quad (2.132)$$

Дотичне напруження в'язкого тертя визначали за формулою:

$$\tau_e = \frac{P_{e.m.}}{2S_{dam}}, \quad (2.133)$$

де: $P_{e.m.}$ – дотичне зусилля в'язкого тертя в шарі потоку, що вимірюється датчиком;

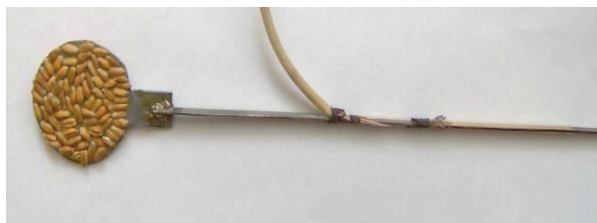
S_{dam} – площа пластини датчика.

Дотичне зусилля в'язкого тертя визначали за формулою:

$$P_{e.m.} = P_{заг.} - P_{торц.смієуд.}, \quad (2.134)$$

де: $P_{заг.}$ – загальне зусилля відхилення датчика (рис. 2.27,а), спричинене тертям про його поверхню та зіткненнями частинок у торець;

$P_{торц.смієуд.}$ – зусилля відхилення датчика (рис. 2.27,б), викликане лише співударяннями частинок у торець.



а)

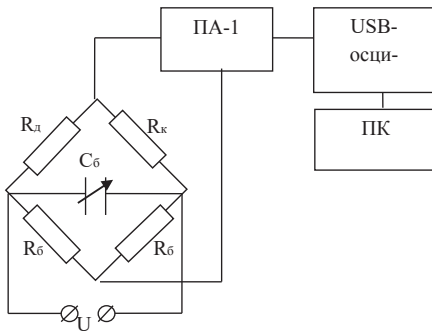


б)

Рис. 2.27. Загальний вигляд датчиків, що використовуються для дослідження коефіцієнтів динамічної в'язкості: а) із круглою пластиною; б) із напівкруглою пластиною

Суть вимірювань в наступному: щоб визначити дотичне зусилля необхідно від загального відняти зусилля від зіткнень частинок в торець датчика. Для цього замість круглої пластини до консольної балочки прикріплювали серповидну пластину малої ширини. Діаметр обох пластин рівний. Для такої пластини можна вважати, що відхилення другого такого датчика від положення рівноваги відбувається тільки за рахунок зіткнень частинок у його торець.

Зусилля відхилення датчика визначали за допомогою тензометрії. Для цього на бічних поверхнях консольної балочки, біля її защемлення (у місця найбільших деформацій), наклеєні та включені до мостової схеми тензорезистори. Електрична схема пристрою визначення дотичного зусилля представлена на рис. 2.28, а [72].



а)



б)

Рис. 2.28. Вимірювання зусиль у засміченому повітряному потоці: а) електрична схема пристрою; б) загальний вигляд підсилювача ПА-1 (ліворуч), USB-осциллографа «IRIS» (праворуч)

При коливаннях датчика відбувається деформація консольної балочки, що викликає деформацію дрітної решітки тензорезисторів. В результаті цього змінюються її геометричні розміри та опір. До вимірювальної бруківки подається напруга. При зміні опору тензорезистора на виході мостової схеми виникають амплітудно-модульовані коливання, де частота, що несе, промодульована частотою вимірюваного процесу. Амплітудно-модульовані коливання з виходу моста подаються на підсилювач ПА-1 [72] і далі на USB-осциллограф «IRIS».

Величина дотичного зусилля в шарі визначається за показаннями осциллографа, і є різницею зусиль відхилення датчика при русі запиленого і потоку і чистого повітря.

Встановлюючи різний процентний вміст частинок домішок у повітряному потоці та змінюючи його засміченість, визначали ефективний динамічний коефіцієнт в'язкості даного потоку.

Величину дотичного зусилля у шарі визначали за допомогою USB-осциллографа «IRIS» та обробляли на комп'ютері (рис. 2.29).

Дану систему рівнянь можна перетворити до вигляду, який містить компоненти вектора швидкості $v_{2x} = \dot{x}_2$, $v_{2z} = \dot{z}_2$:

$$\begin{cases} \dot{v}_{2x} = -C(v_{2x} - w_{III} \sin \beta^*), \\ \dot{v}_{2z} = -g - C(v_{2z} - w_{III} \cos \beta^*), \end{cases} \quad (2.138)$$

з початковими умовами:

$$\begin{cases} v_{2x}(0) = v_{02} \cos \alpha^*, \\ v_{2z}(0) = v_{02} \sin \alpha^*. \end{cases} \quad (2.139)$$

Задача Коші (2.138), (2.139) має точний розв'язок:

$$v_{2x} = v_{2x}(t) = w_{III} \sin \beta^* + e^{-Ct} (-w_{III} \sin \beta^* + v_{02} \cos \alpha^*), \quad (2.140)$$

$$v_{2z} = v_{2z}(t) = w_{III} \cos \beta^* - \frac{g}{C} + e^{-Ct} \left(-w_{III} \cos \beta^* + \frac{g}{C} + v_{02} \sin \alpha^* \right). \quad (2.141)$$

Інтегруючи по часу співвідношення (2.140, 2.141), при початкових умовах $x_2(0) = 0$, $z_2(0) = 0$, отримаємо закон руху частинки в формі $x_2 = x_2(t)$, $z_2 = z_2(t)$. В нашому випадку для отримання графіків зручніше застосувати стандартний метод чисельного розв'язку задачі [73-76].

Підготуємо систему рівнянь (2.136), (2.137) до виду зручного для інтегрування. Введемо позначення $Y_1 = x_2(t)$, $Y_2 = \dot{x}_2(t)$, $Y_3 = z_2(t)$, $Y_4 = \dot{z}_2(t)$ одночасно понижуючи ступінь диференціального рівняння.

Тоді система рівнянь, еквівалентна рівнянням (2.136), (2.137), буде представлена рівняннями:

$$\begin{cases} \dot{Y}_1 = Y_2, \\ \dot{Y}_2 = -C(Y_2 - w_{III} \sin \beta^*), \\ \dot{Y}_3 = Y_4, \\ \dot{Y}_4 = -g - C(Y_4 - w_{III} \cos \beta^*), \end{cases} \quad (2.142)$$

з початковими умовами:

$$\begin{cases} Y_1(0) = 0, \\ Y_2(0) = v_{02} \cos \alpha^*, \\ Y_3(0) = 0, \\ Y_4(0) = v_{02} \sin \alpha^*. \end{cases} \quad (2.143)$$

Скористаємося для розв'язку поставленої задачі Коші чисельним методом Рунге-Кутта п'ятого порядку точності [77-79]. В якості умов виходу з розрахунку приймемо умову попадання відповідної частки на площину $z = -H$, або переміщення частинки уздовж горизонталі на відстань, що не перевершує $10D_1$.

Чисельні розрахунки за вищевказаною методикою проводили при наступних значеннях параметрів:

- щільність матеріалу зерна $\rho_1^0 = 1250 \text{ кг/м}^3$;
- насипна щільність зернової фази $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$;
- насипна щільність фази легких домішок $\rho_2 = 50 \dots 600 \text{ кг/м}^3$;
- щільність повітряного потоку $\rho_3^0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$;
- розмір часток зерна $a_1 = 0,003-0,036 \text{ м}$;
- розмір часток домішок $a_2 = 0,001 \dots 0,01 \text{ м}$;
- кут відхилення повітряного потоку щодо вертикалі $\beta^* = 0 \dots 90^\circ$;
- діаметр тарілчастого розкидача $D_1 = 0,5 \text{ м}$;
- «початковий діаметр» тарілчастого розкидача (рис. 2.6) $d_0 = 0,08 \text{ м}$;
- висота тарілчастого розкидача $h_1 = 0,1 \text{ м}$;

- швидкість повітряного потоку $w_{III} = 5 \dots 7$ м/с;
- швидкість падіння суміші на розкидач $w_2 = 2$ м/с;
- кутова швидкість тарілчастого розкидача $\Omega = 6,2 \dots 16,2$ с⁻¹.

Результати обчислень наведені нижче.

Вилучення легких домішок можливе, якщо частинка буде мати додатне значення вертикальної швидкості в напрямку осі Oz , тобто $V_{2z} > 0$. Крім того необхідною умовою є досягнення частинкою вертикальної координати z на заданій ширині кільцевої зони. Інакше частинка буде залишатися у шарі суміші і рухатися вниз, або стикатися з діафрагмою і також залишатися в суміші.

На значення вертикальної складової легких домішок впливають умови сходу з тарілчастого розкидача, технологічні параметри і фізико-механічні властивості зерна і домішок. Дослідимо залежності V_{2z} від наступних параметрів: кутової швидкості розкидача, швидкості повітряного потоку, розмірів частинок і насипної щільності легких домішок (рис. 2.30-2.33).

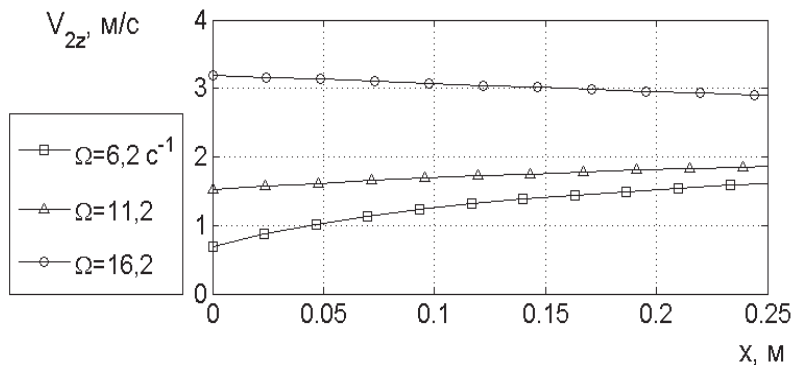


Рис. 2.30. Залежності вертикальних складових швидкостей частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від кутової швидкості тарілчастого розкидача ($w_{III} = 5$ м/с, $a_2 = 0,002$ м, $\rho_2 = 300$ кг/м³)

З рис. 2.30. видно, що значення складових вертикальних швидкостей відмінні на початку та наприкінці кільцевої зони, тому розглянемо зміни в обох випадках. Як видно з рис. 2.30, підвищення кутової швидкості розкидача з 11,2 до 16,2 с^{-1} збільшує вертикальну складову швидкості вилучених легких домішок в 2,1 рази, з 1,5 до 3,2 м/с, на початку кільцевої зони та в 1,5 рази, з 1,9 до 2,9 м/с, в кінці. А зменшення кутової швидкості розкидача, з 11,2 до 6,2 с^{-1} , знижує на 47%, з 1,5 до 0,8 м/с, на початку кільцевої зони та на 13,5%, з 1,85 до 1,6 м/с, в кінці зони. Таким чином, підвищення кутової швидкості тарілчастого розкидача збільшує вертикальну складову швидкості видобутих частинок. Однак при кутовій швидкості тарілчастого розкидача 16,2 с^{-1} спостерігається незначне її зменшення по ширині кільцевої зони.

Підвищення швидкості повітряного потоку апріорно збільшує значення вертикальних складових швидкостей легких домішок, що вилучаються (рис. 2.31). Підвищення швидкості повітряного потоку з 5 до 7 м/с збільшує її в 1,3 рази на початку кільцевої зони, з 1,6 до 2,1 м/с, і в 1,5 рази, з 1,9 до 2,9 м/с, в кінці зони. По ширині кільцевої зони збільшується для всіх значень швидкості повітряного потоку в 1,12-1,28 рази.

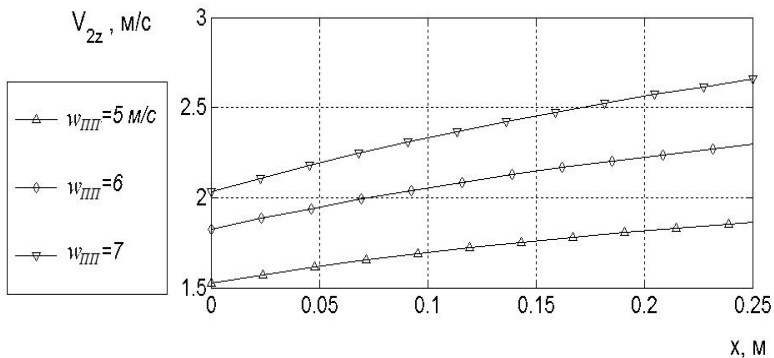


Рис. 2.31. Залежності вертикальних складових швидкостей частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від швидкості повітряного потоку ($\Omega = 11,2 \text{ с}^{-1}$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$)

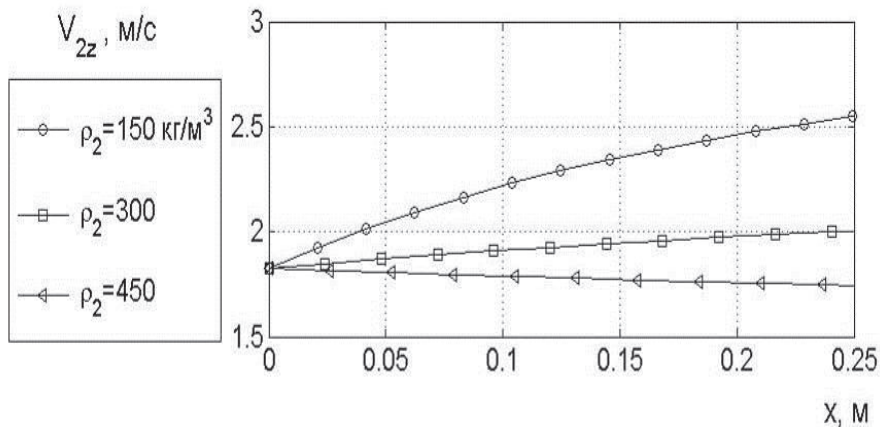


Рис. 2.32. Залежності вертикальних складових швидкостей частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від насипної щільності домішок ($\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $w_{III} = 5 \text{ м/с}$)

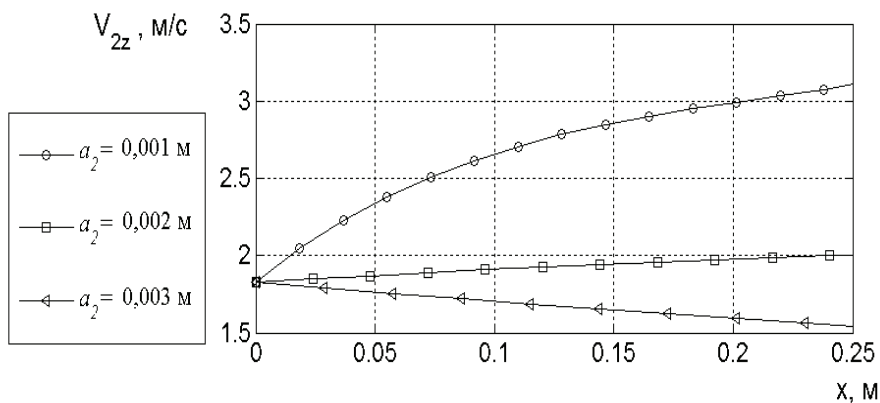


Рис. 2.33. Залежності вертикальних складових швидкостей частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від розмірів домішок ($\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$, $w_{III} = 5 \text{ м/с}$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$)

Зі збільшенням насипної щільності домішок (рис. 2.32), значення вертикальних складових швидкостей вилучених легких домішок зменшується. Так, при її збільшенні з 150 до 450 кг/м³ V_{2z} в кінці кільцевої зони знижується на 31% з 2,6 до 1,8 м/с. Рівні значення на початку кільцевої зони пояснюються умовами сходу з тарілчастого розкидача, для яких зміна насипної щільності частинок і розмірів, як встановлено раніше, є незначними. У випадку наближення насипної щільності домішок до значень зернової фази інтенсивність вилучення суттєво знижується, про що свідчить зменшення вертикальної складової швидкості

Аналогічну картину маємо і при збільшенні 3 розмірів частинок легких домішок (рис. 2.33). Так, збільшення розмірів частинок з 1 до 3 мм знижує V_{2z} в кінці кільцевої зони очищення на 50% з 3,2 до 1,6 м/с. Для частинок розміром 3 мм спостерігається зниження по довжині каналу. Це свідчить про погіршення умов вилучення при русі частинок в кільцевій зоні. За певних умов сходу з розкидача їх вилучення стає неможливим.

Як бачимо, зміни вертикальних складових швидкостей, що слугують показником інтенсивністю процесу вилучення легких домішок, досить наочно дозволяють здійснити порівняння впливу різних чинників. Траєкторії руху частинок легких домішок в цьому відношенні менш інформативні, але дозволяють оцінити можливість вилучення частинки при заданих умовах. Оцінимо вплив кутів сходу частинок з тарілчастого розкидача і відхилення повітряного потоку від вертикалі по траєкторіях руху частинок (рис. 2.34, 2.35).

Розглянемо можливість вилучення частинок легких домішок при ширині кільцевої зони очистки $b^* = 0,3$ м і її висоті $z = H = 0,2$ м. Зі збільшенням кута відхилення повітряного потоку від вертикалі, горизонтальна протяжність траєкторій руху частинок легких домішок збільшується (рис. 2.35).

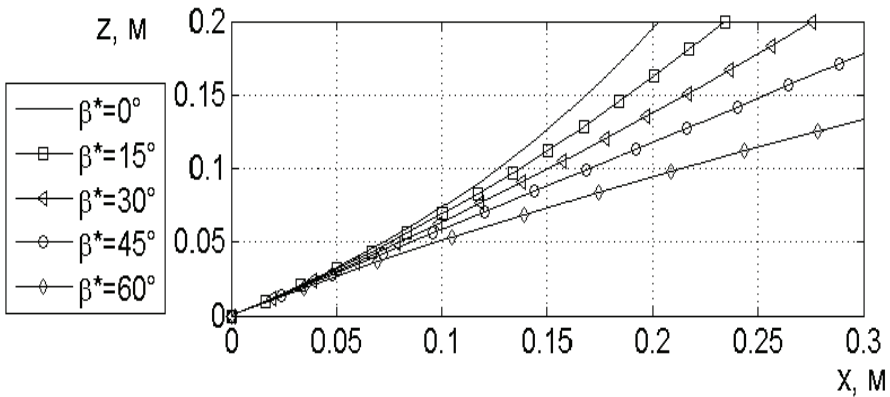


Рис. 2.34. Залежності траєкторій частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від кута β^* ($\alpha^* = 30^\circ$, $\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $w_{III} = 5 \text{ м/с}$, $h_0 = 0,04 \text{ м}$)

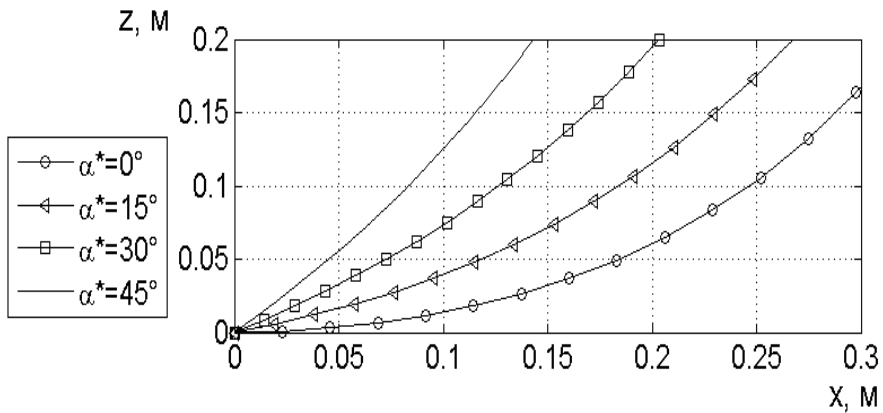


Рис. 2.35. Залежності траєкторій частинок домішок в основній кільцевій зоні очищення від кута α^* ($\beta^* = 0^\circ$, $\Omega = 11,2 \text{ c}^{-1}$, $a_2 = 0,002 \text{ м}$, $\rho_2 = 300 \text{ кг/м}^3$, $w_{III} = 5 \text{ м/с}$, $h_0 = 0,04 \text{ м}$)

Збільшення кута β^* від 0° до 30° збільшує розрахункову ширину кільцевої зони в 1,4 раз, з 0,2 до 0,27 м. При $\beta^* = 45^\circ$ та 60° траєкторії не перетинають вертикальну межу $z = 0,2$ м. Це означає, що дані частки не будуть вилучені і після зіткнення зі стінками пневмосепаруючого пристрою продовжать рух разом з зерною сумішшю.

Збільшення кута сходу суміші α^* з тарілчастого розкидача також зменшує розрахункову ширину кільцевої зони. Так, при його збільшенні (рис. 2.35), понад 15° стає можливим вилучення частинок при обмеженій розрахунковій ширині основної кільцевої зони. А при $\alpha^* = 0^\circ$ траєкторія не перетинає вертикальну межу $z = 0,2$ м. Зменшення α^* від 45° до 15° збільшує її в 1,9 раз, з 0,14 до 0,27 м. Це пояснюється збільшенням V_{2z} на початку кільцевої зони за рахунок вертикальної складової сходу частинок легких домішок з тарілчастого розкидача.

Як бачимо з наведених графіків, крім факторів, що впливають на процес очищення в кільцевому каналі пневмосепаруючого пристрою, важливий вплив має динаміка сепарованої суміші на тарілчастому розкидачу. Це пояснюється малою в'язкістю повітря, що призводить до малості сили Стокса в порівнянні з силою тяжіння. Таким чином, в деяких випадках на вилучення легких домішок більш вагомий вплив мають початкові умови руху суміші в кільцевому каналі. А вони визначаються динамікою руху сепарованої суміші по тарілчастому розкидачу.

2.3. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НА КОНУСНО-КАСКАДНІЙ ПОВЕРХНІ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ

2.3.1. Дослідження псевдозрідженого шару зернової суміші

Вилучення домішок в основній зоні очистки обмежено певними факторами. Тому для збільшення ефективності процесу використовують додаткові зони очистки (рис. 2.24) [6]. Їх використання дозволяє підвищити ефективність процесу очистки, але фізика процесу носить інший характер ніж при очистці в основному каналі і потребує окремого дослідження. Цей процес ґрунтується на гідромеханіці багатofазних середовищ [80-82]. Вилучення легких домішок із зернового шару також здійснюється повітряним потоком. В цій задачі несучим середовищем є повітряний потік, а дисперсними фазами – зерно та легкі домішки. Складні форма частинок та їх взаємодія між собою та повітряний потік призводять до непростих реологічних співвідношень [9, 11, 83-86]. Реологічні співвідношення істотно залежить від характеру руху середовища [44, 87, 88]. Теорія швидких рухів [50, 51] дає співвідношення, подібні до співвідношень нелінійних ньютонівських середовищ, для яких визначальною характеристикою руху є тензор швидкостей деформацій. Зниження інтенсивності руху середовища призводить до інших реологічних співвідношень – в'язкопластичності, пластичності, та до поняття граничної рівноваги [89-92]. Швидкий рух дисперсного середовища може виникнути при значному градієнтному русі середовища, так і за рахунок продування повітряного потоку через шар зерна або накладання високочастотних вібрацій [93-97]. Продування зернового шару повітряним потоком використовується для вилучення легких домішок. При цьому виникає стан зернового шару, що нагадує рідкий стан – середовище переходить у так зване «псевдозріджений» або «псевдокиплячий» стан [80, 98, 99]. Вивченню псевдозрідженого стану сипучих середовищ присвячено багато робіт, у яких досліджуються фізика процесів, будуються фізична та математична

моделі явища [11, 12, 16, 100-104]. Однак досліджень із вилучення легких частинок із шару зернової суміші, що продувається повітряним потоком, а також встановленню при цьому закономірностей його нелінійної динаміки немає.

Розглянемо шар ЗС, який розташовується на еквівалентній повітропроникній поверхні S_1^* (рис. 2.36), що імітує скатну поверхню каскадного конуса [105]. Позначимо через об'ємні α_3^{ob} , α_1^{ob} щільності повітря та зернової фази, відповідно.

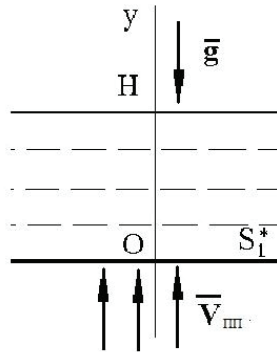


Рис. 2.36. Розрахункова схема до дослідження нелінійної динаміки шару зернової суміші, що продувається повітряним потоком

Під об'ємною щільністю будемо розуміти відношення обсягу повітря V_{III}^{ob} (або зернової суміші V_1^{ob}) в деякій частині середовища в цілому до обсягу цієї частини. Нехай α_{10}^{ob} – об'ємна щільність зерна у спокої (у стані щільної упаковки). Ця величина залежить від того, як упаковані дисперсні частинки [106-111] і навіть для сферичних частинок змінюється в межах $0,52 \div 0,74$ [16, 112, 113]. Вважатимемо розподіл частинок у площині S_1^* однорідним. Позначимо через H_0 глибину шару в упакованому стані. Тоді обсяг такого шару, що припадає на одиницю площі поверхні S_1^* , буде дорівнювати:

$$V_0^{ob} = H_0 \alpha_{10}^{ob}. \quad (2.144)$$

Позначимо початкову швидкість повітряного потоку, що надходить у шар зернової суміші $\vec{V}_{ВП} = V_{ВП} \vec{e}_y$. \vec{e}_y є ортом осі Oy , а $V_{ВП} = const$. При проходженні повітряного потоку через шар зернової суміші, за певної швидкості відбувається його «закипання» (псевдозрідження). Об'ємна щільність α_{10}^{ob} зменшується, а товщина шару H збільшується таким чином, що виконується співвідношення:

$$\int_0^H \alpha_{10}^{ob}(y) dy = H_0 \alpha_{10}^{ob}, \quad (2.145)$$

що виражає рівність кількості зернової суміші до псевдозрідження та після. Експерименти свідчать, що в псевдозрідженому стані об'ємна щільність зернової суміші зменшується зі збільшенням висоти від 0 до H . Шари з протилежним напрямком градієнта $\alpha_1^{ob}(y)$ виявляються нестійкими [11] та руйнуються. Відповідно змінюється й фізика процесу та реологія.

Введемо позначення:

- $\rho_i = \rho_i^0 \alpha_i^{ob}$ – щільність i -го середовища (фази) ($i = 3$ – повітряного потоку, $i = 1$ – зернової суміші), ρ_i^0 – щільність (дійсна) i -го середовища (фази),

- $\vec{v}_i, p_i, \mu_i, \lambda_i$ – швидкість, тиск, зсувна та об'ємна динамічні в'язкості i -го середовища, відповідно,

- \vec{f}_{12} – об'ємна сила, з якою перше середовище впливає на друге.

Відповідно до законів механіки суцільних середовищ рівняння динаміки мають вигляд [9, 114, 115]:

- рівняння нерозривності, що виражає собою закон збереження маси:

$$\frac{\partial \alpha_1^{ob}}{\partial t} + \text{div}(\alpha_1^{ob} \vec{v}_1) = 0, \quad (2.146)$$

- рівняння руху, що виражає собою закон зміни імпульсів для несучого

середовища:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_3 \bar{v}_3}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_3 \bar{v}_3 \bar{v}_3) = \\ & = -\nabla p_3 + \nabla[(\lambda_3 - 2\mu_3 / 3) \operatorname{div} \bar{v}_3] + \operatorname{div}(\mu_3 \nabla \bar{v}_3) + \nabla[\mu_3 \operatorname{div}(\bar{v}_3)] - \vec{f}_{31} + \rho_3 \vec{g}. \end{aligned} \quad (2.147)$$

Аналогічні рівняння мають місце і для дисперсного середовища:

$$\frac{\partial \alpha_1^{oo}}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_1^{oo} \bar{v}_1) = 0, \quad (2.148)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho_1 \bar{v}_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_1 \bar{v}_1 \bar{v}_1) = \\ & = -\nabla p_1 + \nabla[(\lambda_1 - 2\mu_1 / 3) \operatorname{div} \bar{v}_1] + \operatorname{div}(\mu_1 \nabla \bar{v}_1) + \nabla[\mu_1 \operatorname{div}(\bar{v}_1)] + \vec{f}_{31} + \rho_1 \vec{g}. \end{aligned} \quad (2.149)$$

Тут сила \vec{f}_{31} , як зазначалося, відтворює взаємодію між компонентами середовища. Як показують експерименти та емпіричний аналіз, ця величина являє результуючу силу Архімеда, Стокса, Магнуса та сили, пов'язаної з приєднаною масою [11, 114-117]. У разі дослідження динаміки "киплячого" шару зернової суміші силами Архімеда, Магнуса і силою приєднаної маси можна знехтувати. Тоді зазначена сила виражає лише силу в'язкого впливу повітряного потоку на дисперсні частинки. Дія повітряного потоку на одиничну сферичну частку визначається силою Стокса [8, 114]:

$$\vec{F}_{31} = \frac{1}{2} C_\mu \pi a_1^2 |\bar{v}_3 - \bar{v}_1| (\bar{v}_3 - \bar{v}_1), \quad (2.150)$$

де: C_μ – коефіцієнт опору;

a_1 – радіус сферичної частинки зернової фази (у разі несферичних частинок (2.150) вводять поправочний коефіцієнт).

Коефіцієнт C_μ залежить від числа Рейнольдса $Re = 2a_1 \rho_3^0 |\bar{v}_3 - \bar{v}_1| \mu_3^{-1}$. При

великих числах Рейнольдса ($Re \geq 10$) маємо $C_\mu = 0,44$ [12, 119, 120]. Об'ємна сила тоді дорівнює: $\vec{f}_{31} = n_1 \vec{F}_{31}$, де $n_1 = \alpha_1^{ob} \left(\frac{4}{3} \pi a_1^3 \right)^{-1}$ – число дисперсних частинок в одиниці об'єму. Остаточно, отримуємо:

$$\vec{f}_{31} = 0,165 \alpha_1^{ob} a_1^{-1} |\vec{v}_3 - \vec{v}_1| (\vec{v}_3 - \vec{v}_1). \quad (2.151)$$

Рівняння механіки суцільних середовищ є незамкнутою системою диференціальних рівнянь у часткових похідних. Вони мають бути доповнені замикаючими співвідношеннями. Ці співвідношення формують на основі термодинаміки суцільних середовищ та можливих додаткових фізичних міркувань. У цьому випадку ці співвідношення мають вигляд:

$$\alpha_3^{ob} + \alpha_1^{ob} = 1, \quad (2.152)$$

$$p_3 = p_3(\alpha_3^{ob}, T_3), \quad (2.153)$$

$$p_1 = p_1(\alpha_1^{ob}, T_1). \quad (2.154)$$

Рівняння (2.152) є прямим наслідком визначення величин α_i^{ob} . Співвідношення (2.153), (2.154) являють собою термічні рівняння стану (T_3 – температура повітряного потоку, T_2 – температура псевдозрідженої зернової фази) [121-124]. Для повітря зазвичай припускають, що воно баротропне: $p_3 = p_3(\alpha_3^{ob})$, тобто відсутня залежність від температури. Для "киплячого" (псевдозрідженого) зернового шару Гольдштик М.А. [100] встановив рівняння стану, аналогічне до рівняння якогось специфічного газу, у вигляді:

$$p_1 = \frac{107}{1 - k_{ak}^2} \frac{\rho_3^0}{\rho_1^0} \rho_3^0 v_3^2 F(\alpha_1^{ob}), \quad (2.155)$$

де: k_{ak} – коефіцієнт акомодатії для дисперсних частинок [125-128], а функція $F(\alpha_1^{ob})$ визначається співвідношенням:

$$F(\alpha_1^{ob}) = \alpha_1^{ob} \frac{(\alpha_{10}^{ob} / \alpha_1^{ob})^{1/3} - 1}{(1 - \alpha_1^{ob})^2}, \quad (2.156)$$

графік якої представлений на рис. 2.28.

Функція $F(\alpha_1^{ob})$ [101] має максимум на інтервалі $0 < \alpha_1^{ob} < \alpha_{10}^{ob}$ в точці $\alpha_1^{ob} = \alpha_1^{ob*}$, яка поділяє цей інтервал на дві частини: ліва, де похідна $dF / d\alpha_1^{ob} > 0$, та права, де $dF / d\alpha_1^{ob} < 0$. Відповідний знак має і похідна тиску p_1 по α_1^{ob} . Термодинамічна теорія стійкості свідчить, що стан повітря, за якого $dp_1 / d\alpha_1^{ob} > 0$, є нестійким. Протилежний знак похідної говорить про стійкість відповідного стану [121].

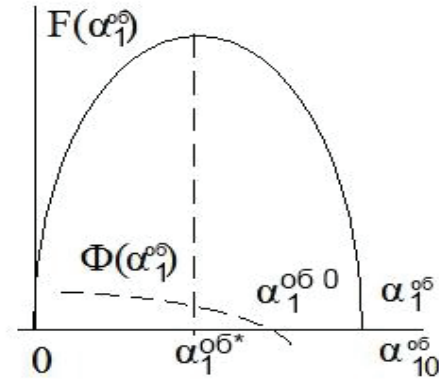


Рис. 2.37. Графік функції $F(\alpha_1^{ob})$

Далі розглянемо рівняння стаціонарного шару, що "кипить". Задачу розглянемо за таких припущень:

- для стаціонарного руху двофазного середовища усереднені швидкості

дисперсної складової дорівнюють нулю, $\vec{v}_1 = 0$;

- рух повітряного потоку усередині зернової суміші одновимірний і спрямований уздовж осі Oy . Відповідно, $\vec{v}_3 = v_3(y)\vec{e}_y$, $p_3 = p_3(y)$, $\rho_1 = \rho_1(y)$, $\alpha_3^{o\delta} = \alpha_3^{o\delta}(y)$, $\alpha_1^{o\delta} = \alpha_1^{o\delta}(y)$.

Тоді, з урахуванням зроблених припущень та співвідношень (2.152) – (2.155), систему диференціальних рівнянь можна подати у вигляді:

$$\frac{d(\alpha_3^{o\delta} v_3)}{dy} = 0, \quad (2.157)$$

$$\frac{d(\alpha_3^{o\delta} v_3^2)}{dy} = -\frac{1}{\rho_3^0} \frac{dp_3}{dy} + \frac{1}{\rho_3^0} \left(\lambda_3 + \frac{1}{3} \mu_3 \right) \frac{d^2 v_3}{dy^2} - \frac{K_\mu}{\rho_3^0} \alpha_1^{o\delta} v_3 - \alpha_3^{o\delta} g, \quad (2.158)$$

$$-K_p \frac{d}{dy} [v_3^2 F(\alpha_1^{o\delta})] + \frac{K_\mu}{\rho_1^0} \alpha_1^{o\delta} v_3 - g \alpha_1^{o\delta} = 0. \quad (2.159)$$

Тут

$$K_\mu = \frac{9\mu_3}{2a_1^2}, \quad K_p = \frac{107}{1-k_{ak}^2} \left(\frac{\rho_3^0}{\rho_1^0} \right)^2. \quad (2.160)$$

Ця система рівнянь має бути доповнена граничними умовами. Для швидкості v_3 при $y=0, H$ задається умова безперервності маси повітряного потоку, що проходить через відповідну межу [16]:

$$\alpha_3^{o\delta} v_3 = V_{III} (y=0, H). \quad (2.161)$$

Рівняння (2.157) інтегрується і призводить до виразу сталості витрати маси через поперечний переріз ($y = const$) шару: $\alpha_3^{o\delta} v_3 = const$, що, з урахуванням (2.152), дозволяє записати вираз:

$$v_3 = \frac{V_{III}}{1 - \alpha_1^{o\sigma}}. \quad (2.162)$$

Після підстановки (2.162) до рівняння (2.159) отримаємо рівняння щодо невідомої $\alpha_1(y)$:

$$-K_p V_{III}^2 \frac{d}{dy} \left[\frac{F(\alpha_1^{o\sigma})}{(1 - \alpha_1^{o\sigma})^2} \right] + \frac{K_\mu V_{III}}{\rho_1^0} \frac{\alpha_1^{o\sigma}}{1 - \alpha_1^{o\sigma}} - g \alpha_1^{o\sigma} = 0. \quad (2.163)$$

Надамо останнє рівняння у формі, зручній для подальшого чисельного дослідження. Для цього продиференціюємо по $\alpha_1^{o\sigma}$ вираз $F(\alpha_1^{o\sigma})(1 - \alpha_1^{o\sigma})^{-2}$.

Введемо позначення:

$$\Phi = \Phi(\alpha_1^{o\sigma}) = \frac{d}{d\alpha_1^{o\sigma}} \left[\frac{F(\alpha_1^{o\sigma})}{(1 - \alpha_1^{o\sigma})^2} \right], \quad (2.164)$$

Розділимо обидві частини рівняння (2.164) на $K_p V_{III}^2 \Phi(\alpha_1^{o\sigma})$. Отримаємо наступний вираз:

$$\frac{d\alpha_1^{o\sigma}}{dy} = \frac{\alpha_1^{o\sigma}}{K_p V_{III}^2 \Phi(\alpha_1^{o\sigma})} \left[\frac{K_\mu V_{III}}{\rho_1^0 (1 - \alpha_1^{o\sigma})} - g \right], \quad (2.165)$$

Вираз (2.165) являє собою нелінійне звичайне диференціальне рівняння першого порядку. Розв'язок цього рівняння, що має фізичний зміст, повинен бути монотонно спадаючим по y . Остання умова ставить певні обмеження щодо параметрів задачі, щодо отримання розв'язку, яке має фізично обгрунтоване значення. Права частина рівняння (2.165) повинна бути негативною. Ця вимога призводить до того, що знаки функцій $\Phi(\alpha_1^{o\sigma})$ та $K_\mu V_{III} - g \rho_1^0 (1 - \alpha_1^{o\sigma})$ мають бути протилежними. Вище було сказано, що умова термодинамічної стійкості стану шару вимагає виконання нерівностей $\alpha_1^{o\sigma*} < \alpha_1^{o\sigma} < \alpha_{10}^{o\sigma}$. У цьому діапазоні

зміни α_1^{ob} , як неважко показати, функція $\Phi(\alpha_1^{ob})$ є монотонно спадаючою і змінює знак при переході через $\alpha_1^{ob} = \alpha_1^{ob0}$ ($\alpha_1^{ob*} < \alpha_1^{ob0} < \alpha_{10}^{ob}$) (рис. 2.37). Псевдозрідження шару при продуванні повітряним потоком починається зі стану з $\alpha_1^{ob} = \alpha_{10}^{ob}$, потім значення α_1^{ob} зменшується. Таким чином, розвиток псевдозрідженого шару відбувається в області $\alpha_1^{ob*} < \alpha_1^{ob} < \alpha_{10}^{ob}$ з негативними значеннями $\Phi(\alpha_1^{ob})$. Отже, функція $K_\mu V_{III} - g\rho_1^0(1 - \alpha_1^{ob})$ у цьому діапазоні має бути позитивною, звідки слідує нерівність:

$$V_{III} > \frac{g\rho_1^0(1 - \alpha_1^{ob})}{K_\mu}. \quad (2.166)$$

Достатньою умовою виконання останньої нерівності є співвідношення:

$$V_{III} > \frac{g\rho_1^0(1 - \alpha_1^{ob0})}{K_\mu}. \quad (2.167)$$

Вільна поверхня шару ($y = H$) характерна тим, що при переході через неї втрачається можливість існування власне псевдозрідженого шару, а параметри завдання набувають значення в області неприпустимих значень. Зокрема, тут α_1 стає рівною або меншою за значення α_1^{ob0} . Ці міркування дозволяють отримати граничну умову при $y = H$ в формі:

$$\alpha_1^{ob}(H) = \alpha_1^{ob0}, \quad (2.168)$$

де: α_1^{ob0} являє собою корінь функції $\Phi(\alpha_1^{ob})$.

Нижче наведемо алгоритм для чисельного розв'язання задачі. Зробимо наступну заміну змінної у вищенаведених співвідношеннях:

$$z = H - y. \quad (2.169)$$

В результаті приходимо до задачі Коші для звичайного диференціального рівняння першого порядку у нормальному вигляді [129]:

$$\frac{d\alpha_1^{o\bar{o}}}{dz} = -\frac{\alpha_1^{o\bar{o}}}{K_p V_{\text{ВП}}^2 \Phi(\alpha_1)} \left[\frac{K_\mu V_{\text{ВП}}}{\rho_2^0 (1 - \alpha_1^{o\bar{o}})} - g \right], \quad (2.170)$$

$$\alpha_1^{o\bar{o}}(0) = \alpha_1^{o\bar{o}0}, \quad (\alpha_1^{o\bar{o}} = \alpha_1^{o\bar{o}}(z)).$$

Для чисельного вирішення цього завдання використовуємо однокроковий метод Рунге-Кутта четвертого порядку з двосторонніми оцінками та автоматичним вибором кроку інтегрування [77, 79]. У процесі чисельного розв'язування рівняння визначається величина:

$$\int_0^z \alpha_1^{o\bar{o}}(\xi) d\xi, \quad (2.171)$$

яка бере участь у визначенні кінця обчислення. Кінець обчислення відбувається тоді, коли виконується співвідношення (2.145). Досягнуте значення z приймаємо рівним товщині псевдозрідженого шару: $z = H$.

Швидкість повітряного потоку визначається після обчислення $\alpha_1^{o\bar{o}}(z)$ за формулою (2.162). Рівняння (2.158) перетворюється на рівняння для визначення розподілу тиску $p_3(z)$ по шару:

$$\frac{dp_3}{dz} = -\rho_3^0 \frac{d(\alpha_3^{o\bar{o}} v_3^2)}{dz} - \left(\lambda_3 + \frac{1}{3} \mu_3 \right) \frac{d^2 v_3}{dy^2} + K_\mu \alpha_1^{o\bar{o}} v_3 + \alpha_3^{o\bar{o}} g, \quad (2.172)$$

яке інтегрується чисельно після знаходження $\alpha_3^{o\bar{o}}, v_3$. Як відомо, тиск у середовищі визначається з точністю до сталої. Тому в розрахунках приймаємо $p_3(0) = 0$. Застосування операції інтегрування до обох частин рівняння (2.165) призводить до наступного виразу тиску:

$$p_3(z) = \rho_3^0 g \int_0^z \alpha_1^{ob}(z) dz + K_\mu V_{вп} \int_0^z \frac{\alpha_1^{ob}(z)}{1 - \alpha_1^{ob}(z)} dz - \left(\lambda_3 + \frac{1}{3} \mu_3 \right) \left[\frac{d v_3}{dz}(z) - \frac{d v_3}{dz}(0) \right] - \rho_3^0 V [v_3(z) - v_3(0)]. \quad (2.173)$$

Результати обчислень наведено як графіків на рис. 2.38 - 2.41. Вихідні дані, які використовували під час розрахунків, наведені в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Вихідні дані для чисельного розв'язку

$\rho_3^0, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\rho_2, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$H_0, \text{м}$	α_{10}^{ob}	$\mu_3, \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$
1,3	750	0,04	0,64	$17,5 \cdot 10^{-6}$

Із графіків (рис. 2.38 - 2.41) видно, що об'ємна щільність зернової суміші монотонно зростає по глибині шару. Причому щільність зернової суміші із збільшенням швидкості повітряного потоку зменшується, що зумовлює роздування шару (збільшенню його висоти). Швидкість повітряного потоку також монотонно зростає з глибиною, що можна пояснити звуженням пор між зернами в нижніх областях шару. Тиск повітряного потоку для невеликих швидкостей із збільшенням висоти шару зростає. Це відповідає реальному розподілу тиску повітряного потоку у стані рівноваги.

Як видно із рис. 2.38 об'ємна щільність змінюється від 0,64 до 0,532, після якої відбувається руйнування шару. При цьому висота шару збільшується на 0,005 м. Зі зростанням швидкості від 5 до 6 м/с об'ємна щільність по глибині шару в середньому зменшується на 0,01. Подальше її збільшення до 7 м/с зміну α_1^{ob} впливає несуттєво.

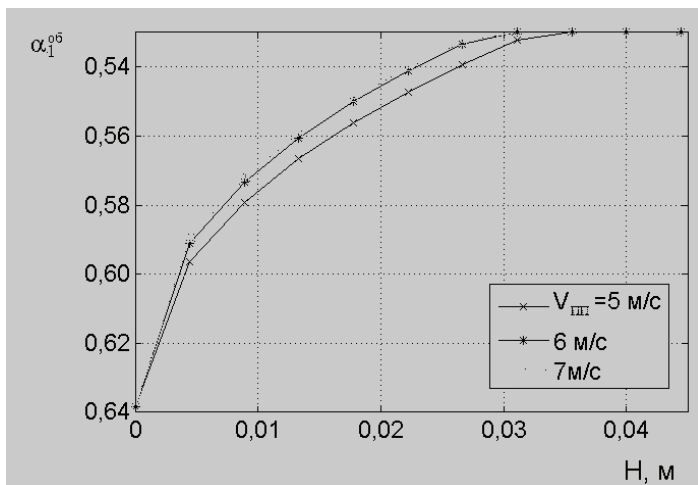


Рис. 2.38. Залежність об'ємної щільності зернової суміші по глибині шару від швидкості повітряного потоку ($H_0 = 0,04$ м, $\rho_1 = 750$ кг/м³, $a_1 = 0,003$ м)

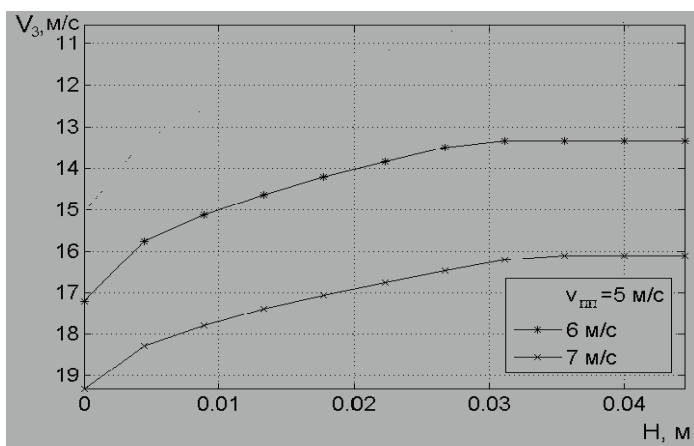


Рис. 2.39. Залежність швидкості повітряного потоку у міжзерновому просторі по глибині шару ($H_0 = 0,04$ м, $\rho_1 = 750$ кг/м³, $a_1 = 0,003$ м)

Як видно із рис. 2.39 швидкість повітряного потоку у міжзерновому просторі зменшується на 20-30 %, з 15-19,5 до 16,9-11,5 м/с. Це, як сказано вище, відбувається через зміну об'ємної густини шару.

Як видно із рис. 2.40, зі збільшенням швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с надлишковий тиск у шарі збільшується на 12,3 %, з 650 до 730 Н/м². Це також відбувається через зміну об'ємної щільності шару за його глибиною.

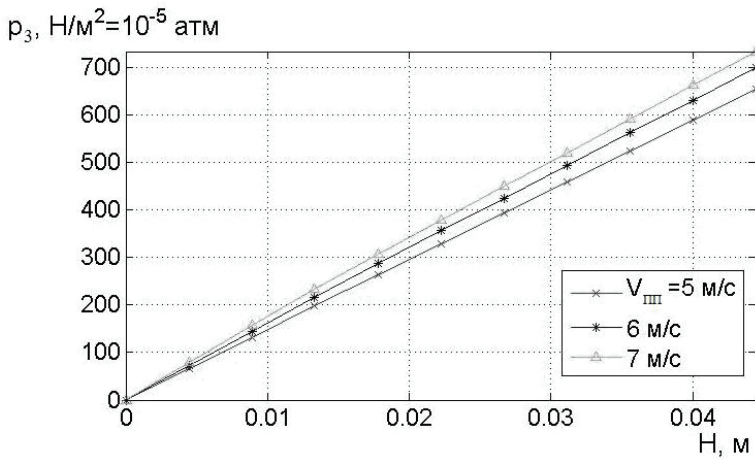


Рис. 2.40. Залежність надлишкового тиску повітряного потоку у міжзерновому просторі по глибині шару від його швидкості ($H_0 = 0,04$ м, $\rho_1 = 750$ кг/м³, $a_1 = 0,003$ м)

Розглянемо зміну надлишкового тиску за різних розмірів зернових частинок (рис. 2.41). Як видно із рис. 2.41 зі збільшенням розмірів зернових частинок з 2,8 до 3,2 мм, надлишковий тиск у шарі збільшується на 48 %, з 540 до 800 Н/м².

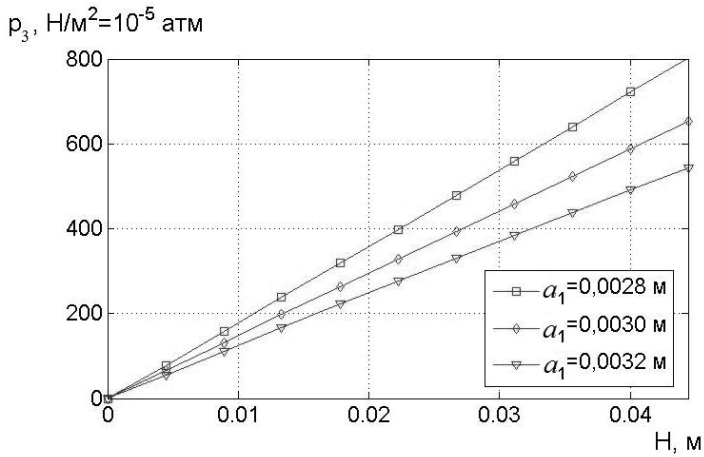


Рис. 2.41. Залежність надлишкового тиску повітряного потоку у міжзерновому просторі по глибині шару від розмірів зернових частинок ($H_0 = 0,04$ м, $\rho_1 = 750$ кг/м³, $V_{III} = 5$ м/с)

Отримані залежності дозволяють провести розрахунок для великого діапазону вихідних даних, які змінюються в залежності від культури, її засміченості, продуктивності сепаратора та інших факторів.

Раніше було встановлено, що в основній кільцевій зоні легкі домішки вилучаються неповністю, тому отримані значення використовуємо для вивчення динаміки легких домішок, що вилучаються на конусно-каскадній поверхні пневмосепаруючого пристрою.

2.4. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НА КОНУСНО-КАСКАДНІЙ ПОВЕРХНІ

Дослідимо рух потоку зерна з легкими домішками по еквівалентній повітропроникній поверхні Σ_1 ($\gamma=0$), нахилений під кутом β до горизонту (рис. 2.42) з урахуванням вище отриманих залежностей. В стаціонарному режимі

зерно з постійною швидкістю надходить через вхідний перетин Σ_0 ($x=0$) висоти h^* (висота повністю визначається розв'язком попередніх задач) і рухається далі шаром малої постійної товщини по поверхні під дією сили тяжіння інтенсивності \bar{g} . Шар зерна продувається повітряним потоком, спрямованим під кутом α по відношенню до нормалі до Σ_1 , що призводить до псевдозріджених зернової суміші. Рух суміші розглянемо на довжині L уздовж скату похилої поверхні Σ_1 . Під впливом повітряного потоку домішкова фаза втягується в рух в нормальному по відношенню до Σ_1 напрямку. І, при досить інтенсивному русі повітряного потоку (а у порах шару суміші, як було показано вище, швидкість повітряного потоку значно вища за критичну швидкість частинок домішок), домішка залишає шар, проходячи через вільну поверхню Σ_2 . Швидкість повітряного потоку для даного процесу є визначальним, регулюючи її, можна добитися режиму провіювання зернової фази від домішки (рух частинок домішкової фази через Σ_2), або, як буде показано нижче, режиму осідання на Σ_1 частинок домішки або зерна іншого сорту відповідно до їх розмірів та щільностей.

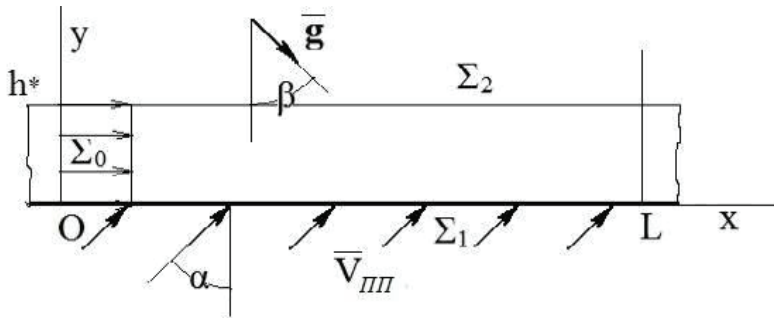


Рис. 2.42. Розрахункова схема до дослідження нелінійної динаміки трифазного середовища "зерно - легкі домішки - повітряний потік" на скатному повітропроникному конусі пневмосепаруючого пристрою

Суміш «зерно – повітряний потік – легкі домішки» будемо розглядати як суцільне трифазне середовище, що описується теорією взаємопроникних континуумів [11]. Кожна фаза рухається як суцільне середовище, що підкоряється загальним законам механіки суцільних середовищ зі своїм реологічним законом [83-86]. Взаємодія фаз між собою визначається емпіричними законами, які враховують дію в'язких сил (сила Стокса), гідродинамічних сил (сила Архімеда), вплив неоднорідності поля швидкостей (сила Магнуса), інерційних сил, пов'язаних з приєднаними масами прискорено рухомого континууму.

Введемо спрощення і знехтуємо явищами теплообміну в середовищах. В такому випадку загальні рівняння нелінійної динаміки кожної з розглянутих фаз будуть являти собою три закони механіки суцільних середовищ: збереження маси, зміни кількості руху:

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_k \vec{v}^{(k)}) = 0, \quad (2.174)$$

$$\rho_k \frac{d^{(k)} \vec{v}^{(k)}}{dt} = \operatorname{div}(\hat{\sigma}^{(k)}) + \vec{F}_k + \rho_k \vec{g}, \quad (2.175)$$

($k=1,2,3$),

і зміни моменту кількості руху [11, 114, 115]. Останній закон механіки суцільних середовищ призводить до симетрії тензора напружень.

Тут в рівняннях (2.173 і 2.174): $\rho_k = \rho_k(t, x, y, z) = \rho_k^0 \varepsilon_k$ – густина; ρ_k^0 – щільність речовини; $\varepsilon_k = \varepsilon_k(t, x, y, z)$ – об'ємна щільність; $\vec{v}^{(k)} = \vec{v}^{(k)}(t, x, y, z)$ – швидкість руху; $\hat{\sigma}^{(k)} = \hat{\sigma}^{(k)}(t, x, y, z)$ – тензор напружень в середовищі – симетричний тензор другого рангу, представлений матрицею коефіцієнтів:

$$\hat{\sigma}^{(k)} = \left\| \sigma_{ij}^{(k)} \right\|_{i,j=1}^3; \quad \frac{d^{(k)} \vec{v}^{(k)}}{dt} = \frac{\partial \vec{v}^{(k)}}{\partial t} + \left(\vec{v}^{(k)} \cdot \nabla \right) \vec{v}^{(k)} - \text{повна похідна для } k\text{-тої фази};$$

$\vec{F}_k = \vec{F}_k(t, x, y, z)$ – об'ємна щільність сили, що враховує взаємодію k -тої фази з іншими фазами.

У разі руху зернового потоку в повітряному потоці переважною є сила Стокса [11, 12, 16]. Будемо індекс «3» відносити до несучої фази – повітряного потоку, а «1» і «2» – до зернового потоку і домішки, відповідно. Тоді маємо:

$$\begin{aligned}\vec{F}_3 &= -\vec{F}_{31} - \vec{F}_{32}, \\ \vec{F}_1 &= \vec{F}_{31} - \vec{F}_{12}, \\ \vec{F}_2 &= \vec{F}_{32} + \vec{F}_{12},\end{aligned}\tag{2.176}$$

де \vec{F}_{jk} – сила, з якою діє j -та фаза на k -ту. Тоді:

$$\begin{aligned}\vec{F}_{31} &= \frac{1}{2} n_1 C_{\mu 31} \pi a_1^2 |\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(1)}| (\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(1)}), \\ \vec{F}_{32} &= \frac{1}{2} n_2 C_{\mu 32} \pi a_2^2 |\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(2)}| (\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(2)}), \\ \vec{F}_{12} &= \frac{1}{2} n_2 C_{\mu 12} \pi a_2^2 |\vec{v}^{(1)} - \vec{v}^{(2)}| (\vec{v}^{(1)} - \vec{v}^{(2)}),\end{aligned}\tag{2.177}$$

де: $C_{\mu jk}$ – коефіцієнти опору для частки k -тої фази в j -тому середовищі;

$n_k = 3\varepsilon_k (4\pi a_k^3)^{-1}$ – число часток k -тої фази в одиниці об'єму;

a_k – радіус частинок k -тої фази (еквівалентний радіус).

Коефіцієнт $C_{\mu jk}$ приймає різні значення в залежності від відносної швидкості руху несучої і дисперсної фаз [12, 120].

При повільному відносному русі, коли число Рейнольдса, $\text{Re}^{(k)} = \rho_1^0 a_k |\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(k)}| \mu_3^{-1} \leq 1$, ($k=1,2$) виконується співвідношення $C_{\mu jk} = 24 / \text{Re}^{(k)}$. У разі великих відносних швидкостей виконується закон Ньютона, $C_{\mu jk} \approx 0,44$.

Реологічні властивості матеріалів компонент суміші відображаються в співвідношеннях, що визначають тензор напружень. При русі рідиноподібних або газоподібних середовищ аргументами тензора напружень є компоненти тензора швидкостей деформацій, який являє собою тензор другого рангу, який можна представити наступною матрицею порядку (3x3) з компонентами:

$$V_{ij}^{(k)} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_j^{(k)}}{\partial x^i} + \frac{\partial v_i^{(k)}}{\partial x^j} \right), \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (2.178)$$

Прийmemo загальноприйняту модель Нав'є-Стокса з лінійним законом [8, 16, 130]:

$$\sigma_{ij}^{(k)} = (-p^{(k)} + \lambda_k \operatorname{div} \vec{v}^{(k)}) \delta_{ij} + 2\mu_k V_{ij}^{(k)}, \quad (2.179)$$

де: $p^{(k)}$ – тиск, обумовлений термічним рівнянням стану;

λ_k, μ_k – динамічні коефіцієнти об'ємної та зсувної в'язкості в k -тій фазі.

У разі «чистого» повітряного потоку коефіцієнти в'язкості для ізотермічних процесів можна вважати сталими. Для багатофазних середовищ ці коефіцієнти залежать, зокрема, від концентрації дисперсної фази. Найпростішим прикладом такої залежності є співвідношення Ейнштейна для слабо концентрованих суспензій [12, 131, 132]. Для тиску залежність від других параметрів в разі газів або рідин встановлюється рівнянням стану відповідно до законів термодинаміки, або відзначається властивістю баротропного середовища: [122, 124]. Для зернового потоку відповідне рівняння стану було отримано Гольдштиком у вигляді [16]:

$$\begin{aligned}
 p_{(1)} &= K_p F(\varepsilon_1) \left[v^{(3)} \right]^2, \\
 F(\varepsilon_1) &= \varepsilon_1 \frac{(\varepsilon_1^0 / \varepsilon_1)^{1/3} - 1}{(1 - \varepsilon_1)^2}, \\
 K_p &= \frac{107}{1 - k_{ak}^2} \frac{(\rho_3^0)^2}{\rho_1^0}.
 \end{aligned}
 \tag{2.180}$$

де: $\varepsilon_1^0 = 0,64$ – об'ємна щільність зернової фази при щільній упаковці;

$k_{ak} = 0,97$ – коефіцієнт акомодатії зернової фази, що відображає пружні властивості матеріалу при зіткненнях.

Розглянемо стаціонарний трифазний потік, коли явна залежність розшукуваних функцій від часу відсутня. Тоді частинні похідні по часу в рівняннях (2.174), (2.175) звернуться в нуль. Вважаємо, що рух середовища є плоским, що відбувається в площині змінних x, y . Осі координат виберемо так, щоб вісь Ox збігалася з похилою поверхнею Σ_1 , а вісь Oy була б перпендикулярна до неї і проходила через вхідний перетин Σ_0 (рис. 2.42). У цьому випадку рівняння динаміки повітряного потоку мають вигляд:

$$\frac{\partial \varepsilon_3 v_x^{(3)}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_3 v_y^{(3)}}{\partial y} = 0,
 \tag{2.181}$$

$$\begin{aligned}
 & v_x^{(3)} \frac{\partial v_x^{(3)}}{\partial x} + v_y^{(3)} \frac{\partial v_y^{(3)}}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_3^0 \varepsilon_3} \frac{\partial p^{(3)}}{\partial x} + \\
 & + \frac{1}{\rho_3^0 \varepsilon_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda_3 - \frac{2}{3} \mu_3 \right) \left(\frac{\partial v_x^{(3)}}{\partial x} + \frac{\partial v_y^{(3)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial v_x^{(3)}}{\partial x} \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial v_x^{(3)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial v_x^{(3)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial v_y^{(3)}}{\partial x} \right) \right\} -
 \end{aligned}
 \tag{2.182}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{3}{8}C_{\mu 31} \frac{\varepsilon_2}{\rho_3^0 a_1 \varepsilon_3} \sqrt{(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)})^2 + (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)})^2} (\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)}) - \\
& -\frac{3}{8}C_{\mu 32} \frac{\varepsilon_2}{\rho_3^0 a_2 \varepsilon_3} \sqrt{(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(2)})^2 + (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(2)})^2} (\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(2)}) + g \sin \beta, \\
& \mathbf{v}_x^{(3)} \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(3)}}{\partial x} + \mathbf{v}_y^{(3)} \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(3)}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_3^0 \varepsilon_3} \frac{\partial p^{(3)}}{\partial y} \\
& + \frac{1}{\rho_3^0 \varepsilon_3} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\lambda_3 - \frac{2}{3} \mu_3 \right) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_x^{(3)}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(3)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(3)}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(3)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_3 \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(3)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_3 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(3)}}{\partial y} \right) \right\} - \\
& -\frac{3}{8}C_{\mu 31} \frac{\varepsilon_1}{\rho_3^0 a_1 \varepsilon_3} \sqrt{(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)})^2 + (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)})^2} (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)}) - \\
& -\frac{3}{8}C_{\mu 32} \frac{\varepsilon_2}{\rho_3^0 a_2 \varepsilon_3} \sqrt{(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(2)})^2 + (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(2)})^2} (\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(2)}) - g \cos \beta,
\end{aligned} \tag{2.183}$$

$$p^{(3)} = p^{(3)}(\varepsilon_3). \tag{2.184}$$

Рівняння динаміки зернового потоку як дисперсної фази перетворюються в наступні співвідношення:

$$\frac{\partial \varepsilon_1 \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_1 \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} = 0, \tag{2.185}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{v}_x^{(1)} \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} + \mathbf{v}_y^{(1)} \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial x} + \\
& + \frac{1}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda_1 - \frac{2}{3} \mu_1 \right) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial x} \right) \right\} + \\
& + \frac{3}{8} C_{\mu 31} \frac{1}{\rho_1^0 a_1} \sqrt{\left(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)} \right)^2 + \left(\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)} \right)^2} \left(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)} \right) - \\
& - \frac{3}{8} C_{\mu 12} \frac{\varepsilon_2}{\rho_1^0 a_2 \varepsilon_1} \sqrt{\left(\mathbf{v}_x^{(1)} - \mathbf{v}_x^{(2)} \right)^2 + \left(\mathbf{v}_y^{(1)} - \mathbf{v}_y^{(2)} \right)^2} \left(\mathbf{v}_x^{(1)} - \mathbf{v}_x^{(2)} \right) + g \sin \beta,
\end{aligned} \tag{2.185}$$

$$\begin{aligned}
& \mathbf{v}_x^{(1)} \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial x} + \mathbf{v}_y^{(1)} \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \frac{\partial p^{(1)}}{\partial y} + \\
& + \frac{1}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\lambda_1 - \frac{2}{3} \mu_1 \right) \left(\frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(1)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_1 \frac{\partial \mathbf{v}_y^{(1)}}{\partial y} \right) \right\} + \\
& + \frac{3}{8} C_{\mu 31} \frac{1}{\rho_1^0 a_1} \sqrt{\left(\mathbf{v}_x^{(3)} - \mathbf{v}_x^{(1)} \right)^2 + \left(\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)} \right)^2} \left(\mathbf{v}_y^{(3)} - \mathbf{v}_y^{(1)} \right) - \\
& - \frac{3}{8} C_{\mu 12} \frac{\varepsilon_2}{\rho_1^0 a_2 \varepsilon_1} \sqrt{\left(\mathbf{v}_x^{(1)} - \mathbf{v}_x^{(2)} \right)^2 + \left(\mathbf{v}_y^{(1)} - \mathbf{v}_y^{(2)} \right)^2} \left(\mathbf{v}_y^{(1)} - \mathbf{v}_y^{(2)} \right) - g \cos \beta,
\end{aligned} \tag{2.187}$$

які повинні бути доповнені рівнянням (2.179). І, нарешті, рівняння руху фази домішки, що розглядається також як дисперсне середовище, набувають вигляду:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \varepsilon_2 \mathbf{v}_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon_2 \mathbf{v}_y^{(2)}}{\partial y} = 0, \\
& \mathbf{v}_x^{(2)} \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(2)}}{\partial x} + \mathbf{v}_y^{(2)} \frac{\partial \mathbf{v}_x^{(2)}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_2^0 \varepsilon_2} \frac{\partial p^{(2)}}{\partial x} +
\end{aligned} \tag{2.188}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{\rho_2^0 \varepsilon_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\lambda_2 - \frac{2}{3} \mu_2 \right) \left(\frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial x} \right) \right\} + \\
& \quad + \frac{3}{8} C_{\mu 32} \frac{\varepsilon_2}{\rho_2^0 a_2 \varepsilon_1} \sqrt{\left(v_x^{(3)} - v_x^{(2)} \right)^2 + \left(v_y^{(3)} - v_y^{(2)} \right)^2} \left(v_x^{(3)} - v_x^{(2)} \right) + \quad (2.189) \\
& \quad + \frac{3}{8} C_{\mu 12} \frac{1}{\rho_1^0 a_2} \sqrt{\left(v_x^{(1)} - v_x^{(2)} \right)^2 + \left(v_y^{(1)} - v_y^{(2)} \right)^2} \left(v_x^{(1)} - v_x^{(2)} \right) + g \sin \beta,
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \quad v_x^{(2)} \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial x} + v_y^{(2)} \frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial y} = - \frac{1}{\rho_2^0 \varepsilon_2} \frac{\partial p^{(2)}}{\partial y} + \\
& \quad + \frac{1}{\rho_2^0 \varepsilon_2} \left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\lambda_2 - \frac{2}{3} \mu_2 \right) \left(\frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial x} + \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial x} \right) + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_2 \frac{\partial v_x^{(2)}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_2 \frac{\partial v_y^{(2)}}{\partial y} \right) \right\} + \\
& \quad + \frac{3}{8} C_{\mu 32} \frac{\varepsilon_2}{\rho_2^0 a_2 \varepsilon_1} \sqrt{\left(v_x^{(3)} - v_x^{(2)} \right)^2 + \left(v_y^{(3)} - v_y^{(2)} \right)^2} \left(v_x^{(3)} - v_x^{(2)} \right) + \\
& \quad + \frac{3}{8} C_{\mu 12} \frac{1}{\rho_1^0 a_2} \sqrt{\left(v_x^{(1)} - v_x^{(2)} \right)^2 + \left(v_y^{(1)} - v_y^{(2)} \right)^2} \left(v_y^{(1)} - v_y^{(2)} \right) - g \cos \beta, \quad (2.190)
\end{aligned}$$

з додатковим співвідношенням для $p^{(2)}$ типу рівняння (1.179). Для об'ємних густин фаз ε_k ($k=1,2,3$) має місце очевидна рівність:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 1, \quad (2.191)$$

що впливає з визначення зазначеної характеристики.

Сформульовані вище співвідношення являють собою систему нелінійних рівнянь в частинних похідних. Для виділення однозначного вирішення цих рівнянь необхідно задати достатнє число граничних умов [133]. На вході Σ_0 , на нижній еквівалентній поверхні Σ_1 , на вільній поверхні Σ_2 мають місце

кінематична і динамічна умови [8, 9, 133]. Така крайова задача відноситься до розряду складних математичних проблем. Тому висунемо подальші припущення, що мають під собою теоретичну і експериментальну основу і дозволяють спростити зазначену задачу. Тоді додатково припустимо наступне:

1. Зернова фаза з домішкою має малу товщину $h \ll L$, а повітряний потік має малу в'язкість. Тому можна вважати, що поле повітряного потоку в шарі визначається розподілом його швидкостей при проході через межу Σ_1 і щільністю зернової фази ε_2 в шарі. У цьому випадку немає необхідності залучати рівняння (2.181) - (2.184).

2. Швидкість руху фаз зерна і домішки значно менше швидкості руху повітряного потоку $|\vec{v}^{(1)}|, |\vec{v}^{(2)}| \ll |\vec{v}^{(3)}|$. Тому відносні швидкості фаз зерна і домішки можна прийняти рівними: $\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(1)} \approx \vec{v}^{(3)}$, $\vec{v}^{(3)} - \vec{v}^{(2)} \approx \vec{v}^{(3)}$.

3. Вертикальна складова швидкості зернової фази в шарі значно менше горизонтальної $|\mathbf{v}_y^{(1)}| \ll |\mathbf{v}_x^{(1)}|$. Сила Стокса в зерновій фазі переважає в порівнянні з силами в'язкості власне псевдозрідженого зернового потоку $\lambda_1 \approx \mu_1 \approx 0$. Тертям зерна об тверду поверхню можна знехтувати. Рух шару зернової фази в цьому випадку стає одновимірним: $\vec{v}^{(1)} = \vec{v}^{(1)}(x) = (v_x^{(1)}(x), 0)$.

4. Об'ємна щільність частинок домішки істотно менше об'ємної щільності зерна в потоці $\varepsilon_2 \ll \varepsilon_1$. Тому, по-перше, впливом домішки на рух зерна можна знехтувати, по-друге, співвідношення (2.190) можна розглядати як рівняння, що зв'язує ε_3 і ε_1 :

$$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 = 1, \quad (2.192)$$

по-третє, взаємодією частинок домішки між собою можна знехтувати. Це призводить до того, що $\lambda_2 = \mu_2 = p^{(2)} = 0$. У цьому випадку рух кожної частинки

домішки можна розглядати окремо, враховуючи із зовнішніх сил силу тяжіння і Стокса.

У зв'язку з вищевикладеним, зробимо спрощення системи рівнянь.

Граничні умови для повітряного потоку $\vec{v}^{(3)}$ на стінці $\Sigma_1 (y=0)$ задаються виходячи з безперервності дотичної складової швидкості:

$$v_x^{(3)}(x,0) = V_{III} \sin \alpha, \quad (2.193)$$

і безперервності потоку маси в нормальному напрямку [9]:

$$\varepsilon_2(x,0) v_y^{(2)}(x,0) = V_{III} \cos \alpha. \quad (2.194)$$

В силу малості товщини шару можна вважати, що $\vec{v}_{(2)}$ не залежить від змінної y : $\vec{v}^{(2)} = \vec{v}^{(2)}(x)$. Тоді, згідно з (2.192) - (2.194), отримаємо розподіл швидкості повітряного потоку в шарі у вигляді:

$$\vec{v}^{(3)}(x) = \left(v_x^{(3)}, v_y^{(3)} \right) = \left(V_{III} \sin \alpha, \frac{V_{III} \cos \alpha}{\varepsilon_3(x)} \right) = \left(V_{III} \sin \alpha, \frac{V_{III} \cos \alpha}{1 - \varepsilon_1(x)} \right), \quad (2.195)$$

де: V_{III} – постійна величина.

Рівняння руху потоку зерна (2.178), (2.179) при зазначену припущені спрощуються и мають вигляд:

$$\frac{d}{dx} (\varepsilon_1 v_x^{(1)}) = 0, \quad (2.196)$$

$$v_x^{(1)} \frac{dv_x^{(1)}}{dx} = -\frac{1}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \frac{dp^{(1)}}{dx} + \frac{0,165}{\rho_1^0 a_1} \sqrt{\left(v_x^{(3)} \right)^2 + \left(v_y^{(3)} \right)^2} v_x^{(3)} + g \sin \beta, \quad (2.197)$$

з додатковим співвідношенням (1.180). Дана система рівнянь (1.180), (2.196), (2.197) є замкненою щодо невідомих $\varepsilon_1, p^{(1)}, v_x^{(1)}$.

Інтегруючи перше рівняння по x , отримаємо вираз, який дозволить виключити змінну $v_x^{(1)}(x)$:

$$\varepsilon_1(x)v_x^{(1)}(x) = \varepsilon_1(0)v_x^{(1)}(0). \quad (2.198)$$

Тут $\varepsilon_1(0)$, $v_x^{(1)}(0)$ – величини, що задаються в початковому перетині Σ_0 .

Рівняння (1.179) дозволяє виключити тиск $p^{(3)}(x)$. Провівши дану процедуру, з (2.196) отримаємо остаточне рівняння щодо $\varepsilon_1(x)$:

$$\frac{d\varepsilon_1}{dx} = \left[\frac{0,165}{\rho_1^0 a_1} (V_{III} \sin \alpha)^2 + g \sin \beta \right] \left(\frac{K_p}{\rho_1^0 \varepsilon_1} \frac{dF(\varepsilon_1)}{d\varepsilon_1} - \frac{Q_0^2}{\varepsilon_1^3} \right)^{-1}, \quad (2.199)$$

де: $Q_0 = \varepsilon_1^0 V_{III} \sin \alpha \approx 0,64 V_{III} \sin \alpha$.

Для отриманого звичайного диференціального рівняння сформулюємо задачу Коші з початковими умовами:

$$\varepsilon_1(0) = \varepsilon_1^0. \quad (2.200)$$

Рішення задачі (2.199), (2.200) знаходиться на інтервалі $x \in [0, L]$. При цьому, в процесі обчислень, відстежуємо момент, коли ε_1 стає менше ε_{10} – значення об'ємної щільності зернової фази, при якій шар стає нестабільним – руйнується.

Рух частинки домішки будемо описувати рівнянням, що впливають із співвідношення (2.201):

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = m \vec{g} + \vec{F}_{32} + \vec{F}_{12}, \quad (2.201)$$

де: $m = \frac{4}{3} \pi a_3^3 \rho_3^0$ – маса однієї частинки;

$\vec{r} = \vec{i}x + \vec{j}y$ – радіус-вектор частинки;

(x, y) – її координати;

\vec{i}, \vec{j} – орти декартової системи координат;

$$\vec{F}_{32} = \frac{1}{2} C_{\mu 32} \pi a_2^2 |\vec{v}^{(3)}| \vec{v}^{(3)}; \vec{F}_{12} = \frac{1}{2} K_z C_{\mu 12} \pi a_2^2 |\vec{v}^{(1)} - \vec{v}^{(2)}| (\vec{v}^{(1)} - \vec{v}^{(2)}) - \text{сила}$$

Стокса, що діє з боку повітряного потоку і зернової фази, відповідно;

K_z – феноменологічний коефіцієнт, що враховує відміну сили Стокса для зерна від відповідної сили для повітряного потоку ($K_z \approx 5$).

В якості вихідних даних (2.201) задаємо положення частинки домішки в початковий момент часу:

$$\vec{r}(0) = \vec{j}y_0, \quad (2.202)$$

розташовуючи її у вхідному перетині $x(0) = 0$.

Другою умовою є задана швидкість частинки в початковий момент часу:

$$\frac{d\vec{r}}{dt}(0) = (\dot{x}(0), \dot{y}(0)) = (v_x^{(1)}(0), 0) = (\dot{x}_0, 0). \quad (2.203)$$

В остаточному вигляді задача визначення закону руху частки домішки в координатній формі має вигляд:

$$\ddot{x} = g \cos \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_x^{(3)} + \right. \\ \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2} (v_x^{(1)} - v_x^{(2)}) \right\}, \quad (2.204)$$

$$\ddot{y} = -g \sin \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_y^{(3)} + \right. \\ \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - v_x^{(2)})^2 + (v_y^{(1)} - v_y^{(2)})^2} (v_y^{(1)} - v_y^{(2)}) \right\}, \quad (2.205)$$

$$\begin{aligned}x(0) &= 0, & \dot{x}(0) &= \dot{x}_0, \\y(0) &= y_0, & \dot{y}(0) &= 0.\end{aligned}\tag{2.206}$$

Поле швидкостей повітряного потоку, що проходить через шар зерна з домішкою, визначається співвідношеннями (2.195).

Об'ємну щільність зерна $\varepsilon_1(x)$ визначаємо чисельним розв'язанням задачі Коші (2.199), (2.200) методом Рунге-Кутта п'ятого порядку [74, 77]. В якості опції виходу використовуємо або досягнення x -вої координати частинки значення L , або досягнення частинкою верхньої межі Σ_2 ($y=h$), або зниження значення $\varepsilon_1(x)$ до значення ε_{10} , що відповідає умові руйнування шару. Випадки руйнування шару фіксуємо і використовуємо надалі при розрахунку руху часток домішки. Після визначення $\varepsilon_1(x)$ поле швидкостей зерна $\vec{v}_{(1)}$ розраховуємо із застосуванням формули (2.193):

$$\vec{v}_{(1)} = \left(\frac{\varepsilon_1(0)v_x^{(1)}(0)}{\varepsilon_1(x)}, 0 \right).\tag{2.207}$$

Рух частинок домішки описується системою звичайних диференціальних рівнянь другого порядку (2.204), (2.205) і початковими умовами (2.206). Тут залежними змінними є функції часу $x = x(t)$, $y = y(t)$, що представляють собою закон руху частинки домішки. Інтервал часу, на якому відбувається пошук розв'язку, заздалегідь невідомий. Тому тут перейдемо до нової незалежної змінної x . Позначимо праві частини рівнянь (2.203), (2.204) через f_1, f_2 :

$$\begin{aligned}f_1 = f_1(x, \dot{x}, \dot{y}) &= g \cos \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_x^{(3)} + \right. \\ &\left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - \dot{x})^2 + (v_y^{(1)} - \dot{y})^2} (v_x^{(1)} - \dot{x}) \right\},\end{aligned}\tag{2.208}$$

$$f_2 = f_2(x, \dot{x}, \dot{y}) = -g \sin \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_y^{(3)} + \right. \\ \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - \dot{x})^2 + (v_y^{(1)} - \dot{y})^2} (v_y^{(1)} - \dot{y}) \right\}. \quad (2.209)$$

Тоді рівняння (2.204), (2.205) приймуть вигляд:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = f_1 \left(x, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right), \quad (2.210)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = f_2 \left(x, \frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt} \right). \quad (2.211)$$

Зробимо заміну змінної t на змінну x : $t = t(x)$.

Позначимо:

$$Y_1(x) = \dot{x} = \dot{x}[t(x)], \\ Y_2 = Y_2(x) = y[t(x)], \\ Y_3 = \frac{dY_2}{dx}. \quad (2.212)$$

Тоді отримаємо наступні співвідношення:

$$\ddot{x} = \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{dY_1}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{dY_1}{dx} \dot{x} = Y_1 \frac{dY_1}{dx},$$

$$\dot{y} = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{dx} \frac{dx}{dt} = Y_1 \frac{dy}{dx} = Y_1 \frac{dY_2}{dx}, \quad (2.213)$$

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{dY_2}{dx} \frac{dx}{dt} = Y_1 \frac{dY_2}{dx}.$$

Підставляючи їх в рівняння (2.211), отримуємо наступну систему звичайних диференціальних рівнянь першого порядку в нормальному вигляді [129, 134]:

$$\begin{aligned}\frac{dY_1}{dx} &= f_1(x, Y_1, Y_2) / Y_1, \\ \frac{dY_2}{dx} &= Y_3,\end{aligned}\tag{2.214}$$

$$\frac{dY_3}{dx} = [f_2(x, Y_1, Y_2) - f_1(x, Y_1, Y_2)Y_3] / Y_1^2,$$

або в більш розгорнутій формі:

$$\begin{aligned}\frac{dY_1}{dx} &= \left\{ g \cos \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left[\sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_x^{(3)} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - \dot{x})^2 + (v_y^{(1)} - \dot{y})^2} (v_x^{(1)} - \dot{x}) \right] \right\} / Y_1,\end{aligned}\tag{2.215}$$

$$\begin{aligned}\frac{dY_3}{dx} &= \left[\left\{ -g \sin \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left\{ \sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_y^{(3)} + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - \dot{x})^2 + (v_y^{(1)} - \dot{y})^2} (v_y^{(1)} - \dot{y}) \right\} - \right. \\ &\quad \left. - \left\{ g \cos \beta + \frac{0,165}{\rho_2^0 a_2} \left[\sqrt{(v_x^{(3)})^2 + (v_y^{(3)})^2} v_x^{(3)} + \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + K_z \sqrt{(v_x^{(1)} - \dot{x})^2 + (v_y^{(1)} - \dot{y})^2} (v_x^{(1)} - \dot{x}) \right] \right\} \right] / Y_1^2,\end{aligned}$$

з початковими умовами:

$$Y_1(0) = \frac{Q_0}{\varepsilon_1(0)}, \quad Y_2(0) = y_0, \quad Y_3(0) = 0.\tag{2.216}$$

Вважаємо, що частинка домішки залишає шар (очищення зерна від домішок), якщо вона до досягнення кінця шару $x = L$ проходить через межу Σ_2 ($y = h$). Частинки, які осідають на повітропроникну поверхню Σ_1 ($y = 0$) або досягають кінця шару $x = L$, вважаємо такими, що залишаються в шарі.

Результати чисельного розв'язку наведені на рис. 2.43 - 2.53. Розрахунок проведено для наступних вихідних даних: $h^*=0,04$ м; $\rho_3^0=1,3$ кг/м³; $\rho_1=750$ кг/м³; $\rho_2=300$ кг/м³; $\beta=45^\circ$; $\varepsilon_1^0=0,64$; $k_{ак}=0,97$; $K_z=5$; $a_1=0,0035$ м.

Як видно з рис. 2.43 зміна максимальної довжини стійкого шару залежить від швидкості повітряного потоку незначно. Вона зменшується на 3-20% зі збільшенням швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с; зі збільшенням початкової швидкості руху зернової суміші від 0,5 до 1,5 м/с вона збільшується в 6 разів, з 0,1 м до 0,6 м.

Як видно з рис. 2.44, швидкість збільшується, а об'ємна щільність зменшується по довжині на похилій площині Σ_1 . У ряді випадків, залежно від вихідних умов, помічається руйнування шару до досягнення $x = L$.

Максимальна довжина стійкого шару при збільшенні швидкості повітряного потоку з 5 до 7 м/с (рис. 2.44) зменшується на 12-14%, з 0,28-0,32 до 0,24-0,28 м; і на 14-17%, при збільшенні α від 30° до 60° .

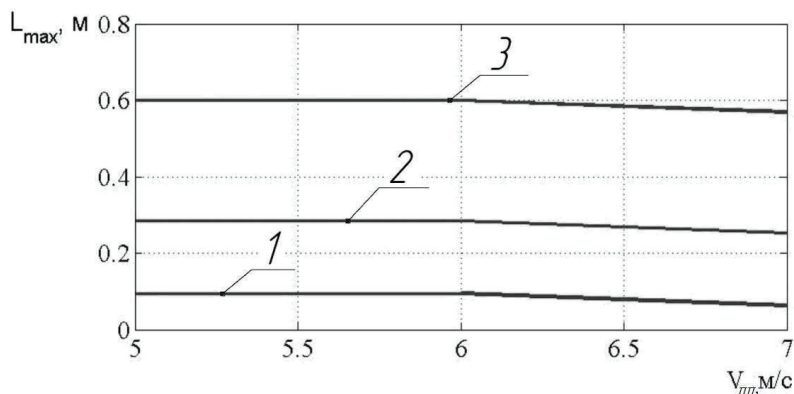


Рис. 2.43. Залежності граничної довжини стійкого шару від швидкості повітряного потоку і початкової швидкості зернової суміші: 1 - $v_{x0}^{(1)}=0,5$ м/с; 2 - $v_{x0}^{(1)}=1$ м/с; 3 - $v_{x0}^{(1)}=1,5$ м/с ($\alpha=45^\circ$, $\beta=37^\circ$)

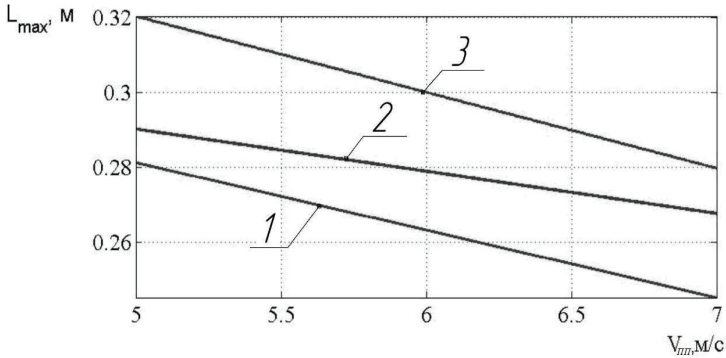


Рис. 2.44. Залежно граничної довжини стійкого шару від швидкості і напрямку повітряного потоку: 1 – $\alpha = 30^\circ$; 2 – $\alpha = 45^\circ$; 3 – $\alpha = 60^\circ$ ($\beta = 37^\circ$, $v_{x0}^{(1)} = 1$ м/с)

Зі збільшенням β від 30° до 60° (рис. 2.45) максимальна довжина стійкого шару збільшується на 59-68%, з 0,22 до 0,35 м при $V = 5$ м/с і з 0,19 до 0,32 м при $V = 7$ м/с. Залежно від швидкості повітряного потоку вона зменшується на 8-13%.

Як видно з рис. 2.46, x -ва складова швидкості зростає по довжині конусно-каскадної поверхні, збільшуючись в 2,3-5 разів, від 0,5-1,5 до 2,5-3,5 м/с. Зі збільшенням початкової швидкості зернової суміші від 0,5 до 1,5 м/с x -ва складова швидкості збільшується на 0,4-0,5 м/с.

Таким чином, на зміну максимальної довжини стійкого шару найбільший вплив робить початкова швидкість руху зернової суміші. Зміна швидкості потоку зернової суміші уздовж конусно-каскадної поверхні розглянемо в залежності від його початкової швидкості (рис. 2.47). Як видно з рис. 2.47, зі збільшенням розмірів частинок, вертикальна складова швидкості їх виходу зменшується, з 0,6 до 0,05 м/с, а при розмірі понад 0,002 м – вилучення стає неможливим.

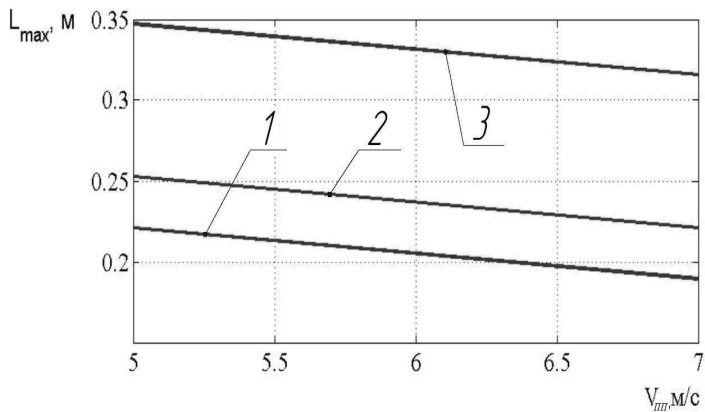


Рис. 2.45. Залежності граничної довжини стійкого шару від швидкості і кута установки скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою: 1 – $\beta = 30^\circ$; 2 – $\beta = 45^\circ$; 3 – $\beta = 60^\circ$ ($\alpha = 45^\circ$, $v_{x0}^{(1)} = 1 \text{ м/с}$)

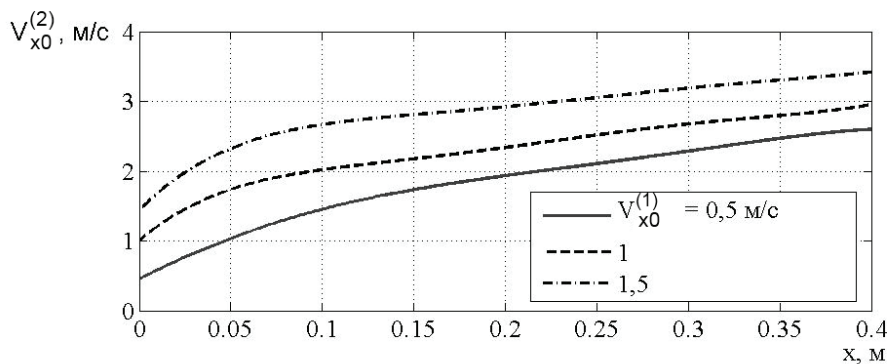


Рис. 2.46. Залежності зміни x -вої складової швидкості зернової суміші по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою від початкової швидкості суміші ($h^* = 0,04 \text{ м}$, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V_{in} = 5 \text{ м/с}$)

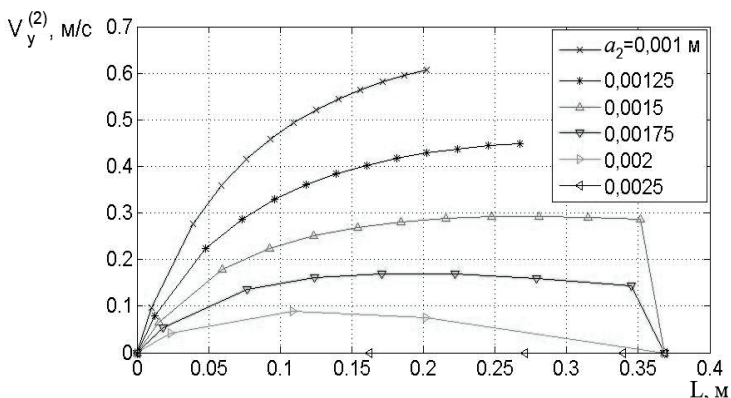


Рис. 2.47. Залежності швидкості виходу частинок домішки з шару по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою від їх розмірів ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V_{III} = 5$ м/с, $v_{x0}^{(1)} = 1,2$ м/с, $\rho_2 = 300$ кг/м³)

Розглянемо як змінюються вертикальні складові для частинок розміром 0,0015 м зі зміною швидкості повітряного потоку (рис. 2.48) і щільності частинок (рис. 2.49), а також початкової швидкості зернової суміші (рис. 2.50).

Зі збільшенням швидкості повітряного потоку (рис. 2.49) швидкість виходу частинки збільшується в 2,3 рази з 0,42 до 0,96 м/с. З ростом швидкості повітряного потоку мінімальна необхідна довжина повітропроникної поверхні зменшується на 50%, з 0,26 до 0,13 м.

З рис. 2.50 видно, що швидкість виходу частинки зменшується в 15 раз, з 0,75 до 0,05 м/с. Мінімальна необхідна довжина повітропроникної поверхні збільшується в 1,1 рази з 0,13 до 0,27 м.

На рис. 2.49, 2.50 графіки, побудовані для частинок з $\rho_2 \geq 300$ кг/м³ і $V_{x0}^{(1)} = 1$ м/с, перетинають вісь абсцис. Це свідчить про те, що вилучаються не всі частинки. При цьому збільшення довжини повітропроникної скатної поверхні не дає ніякого результату. Це дозволяє раціонально вибрати довжину повітропроникної скатної поверхні.

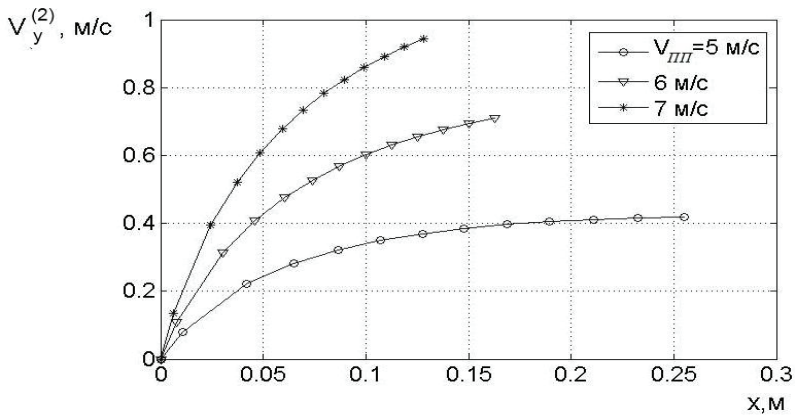


Рис. 2.48. Залежності по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою швидкості виходу частинок домішки з шару від швидкості повітряного потоку ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $a_2 = 0,00125$ м, $v_{x0}^{(1)} = 1$ м/с, $\rho_2 = 300$ кг/м³)

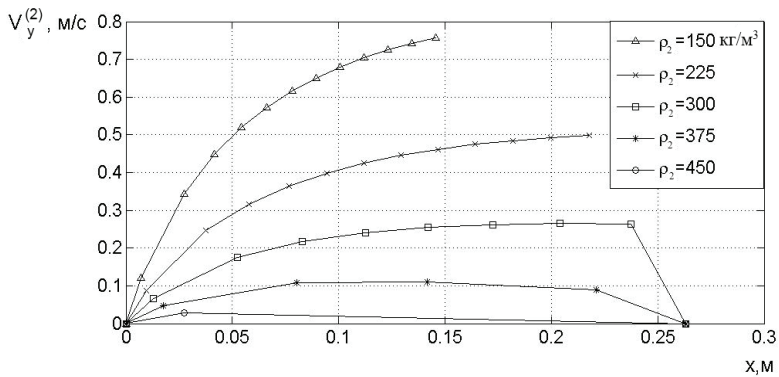


Рис. 2.49. Залежності швидкості виходу частинок домішки з шару від їх насипної щільності по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $a_2 = 0,0015$ м, $v_{x0}^{(1)} = 1$ м/с, $w_{III} = 5$ м/с)

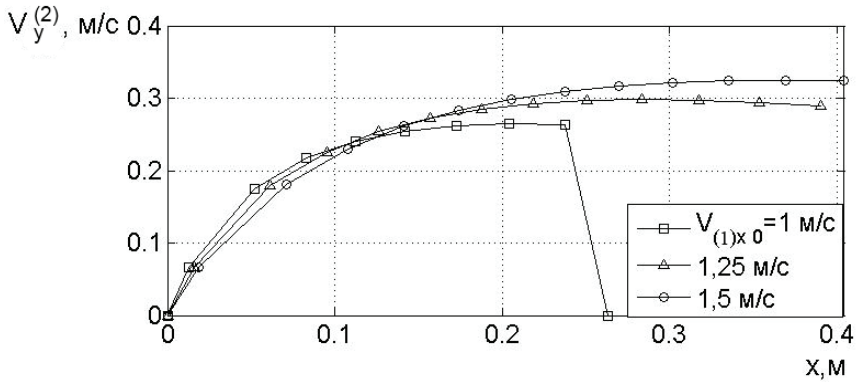


Рис. 2.50. Залежності швидкості виходу частинок домішки з шару від початкової швидкості зернової фази по довжині скатної повітропроникної поверхні ПСП ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $a_2 = 0,0015$ м, $\rho_2 = 300$ кг/м³, $V_{III} = 5$ м/с)

З рис. 2.50 видно, що швидкість виходу частинки збільшується на 15% з 0,27 до 0,33 м/с. Вилучення частинок при цьому можливо на більшій довжині повітропроникної поверхні. Вона збільшується в 1,63 рази з 0,27 до 0,41 м.

На рис. 2.51 представлені траєкторії руху частинок домішок, що мають різні розміри при однаковій щільності. Це дозволяє прогнозувати можливість вилучення домішок повітряного потоку в залежності від їх розмірів. Як видно з рис. 2.51, частинки менших розмірів вилучаються з суміші на початковому етапі очищення на досить короткій ділянці повітропроникної поверхні. Частинки розміром $a_2 \leq 0,00125$ м повністю видаляються на ділянці $x \leq 0,25$ м. Зі збільшенням лінійних розмірів частинок потрібна все більша довжина повітропроникної поверхні. При подальшому збільшенні лінійних розмірів частка припиняє рух до верхніх шарів, і її вилучення стає неможливим. І, нарешті, більш великі частинки здійснюють рух до нижерозташованих шарів ЗС, що вказує на неможливість їх вилучення повітряним потоком.

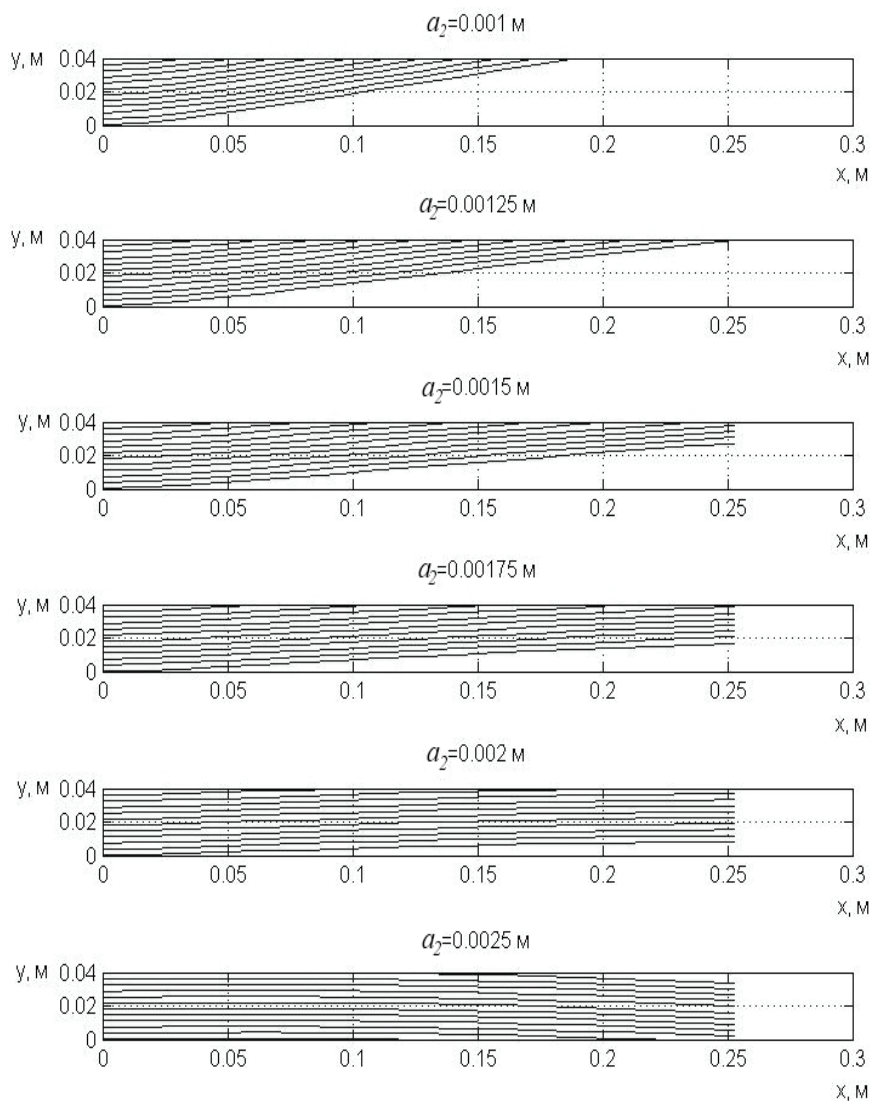


Рис. 2.51. Траєкторії руху легких частинок в шарі ЗС по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою в залежності від їх розмірів ($h^* = 0,04 \text{ м}$, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V_{x0}^{(1)} = 1 \text{ м/с}$, $V_{III} = 5 \text{ м/с}$)

Вивчимо вплив повітряного потоку на траєкторії легких частинок, обмежившись розглядом лише частинок, які вилучаються з нижніх шарів (рис.2.52).

Як видно з рис. 2.52, частинки домішок з розмірами $a_2 \geq 0,0015$ м не вилучаються з нижніх шарів ЗС, в той час як вищерозташовані частинки можуть бути вилучені при швидкості повітряного потоку 5 м/с (рис. 2.53). Для вилучених частинок з ростом швидкості від 6 до 7 м/с довжина повітропроникної поверхні може бути зменшена на 26 %, з 0,19 до 0,14 м.

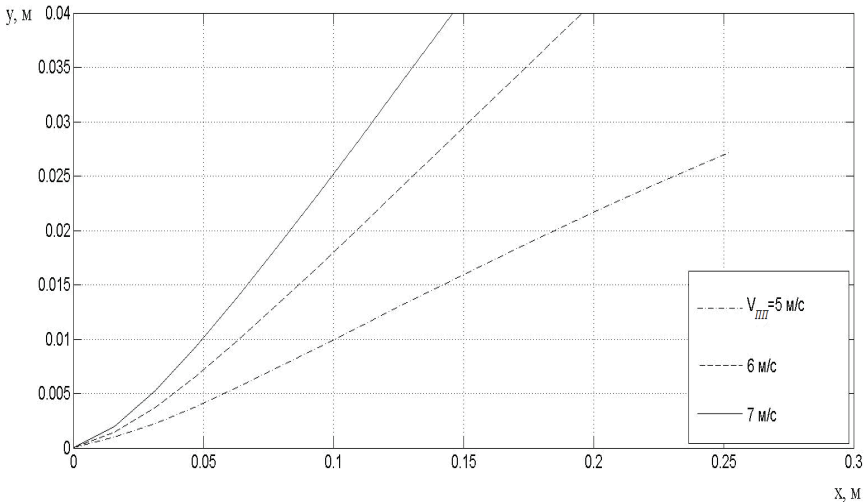


Рис. 2.52. Траєкторії руху легких частинок в шарі зернової суміші по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою в залежності від швидкості повітряного потоку ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $a_2 = 0,0015$ м, $v_{x0}^{(1)} = 1$ м/с)

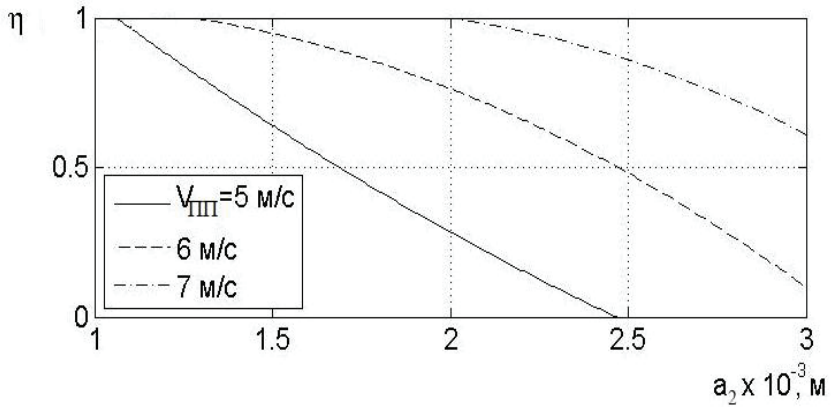


Рис. 2.53. Залежності коефіцієнта ефективності процесу очищення ЗС від розмірів легких частинок і швидкості повітряного потоку ($h^* = 0,04$ м, $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $\rho_2 = 300$ кг/м³, $v_{x0}^{(1)} = 1$ м/с)

Важливою характеристикою роботи пневмосепаруючого пристрою є відносне число частинок, що залишають шар. Назвемо цю характеристику коефіцієнтом ефективності процесу очищення і позначимо її через η . Вона являє собою відношення N_{out} числа частинок, що покинули шар, до N_{in} числа частинок, які увійшли в шар через вхідний отвір. N_{in} та N_{out} визначаються за траєкторіями руху частинок:

$$\eta = \frac{N_{out}}{N_{in}}. \quad (2.217)$$

Як видно з рис. 2.53, з ростом швидкості повітряного потоку ефективність процесу очищення зростає: при $\eta \geq 0,7$ і $V_{III} = 5$ м/с вилучаються частки $a_2 \leq 1,2$ мм, а при $V_{III} = 7$ м/с – $a_2 \leq 2,5$ мм. Для частинок $a_2 \leq 1,5$ мм ($\rho_2 \leq 300$ кг/м³) з ростом швидкості η збільшується з 65 до 100%, тобто в 1,5 рази.

Розв'язок математичних моделей нелінійної динаміки дво- і трифазного суцільного середовища «зерно – легкі домішки – повітряний потік» дозволили спрогнозувати вилучення легких домішок, розрахувати ефективність процесу очищення зернової суміші залежно від розмірів видобутих легких частинок і технологічних характеристик сепаратора (завантаження пневмосепаруючого пристрою і швидкість повітряного потоку), а також визначити конструктивні параметри розробленого пневмосепаруючого пристрою. Подальші дослідження зарубіжних авторів в теорії суцільних середовищ [27, 135-142] дозволяють ще більш детально описувати нелінійну динаміку процесу очищення і сепарування зернових сумішей.

Висновки до розділу 2

1. В результаті проведених теоретичних досліджень створено математичні моделі нелінійної динаміки: двофазного потоку зернової маси (зернова фаза – домішкова фаза) на тарілчастому розкидачу для встановлення зміни складових швидкостей і траєкторій зернових частинок і легких домішок перед входженням в кільцеві зони очищення; суцільного трифазного – середовища «зерно – легкі домішки - повітряний потік» в основний кільцевій зоні і на конусно-каскадній поверхні розробленого пневмосепаруючого пристрою. У моделях вперше враховано взаємодію фаз суміші як суцільних середовищ з реологічними законами, які визначають вплив в'язких, гідродинамічних, інерційних сил, неоднорідності поля швидкостей рухомих, взаємопроникних континуумів.

2. Проведеним аналізом результатів математичного моделювання динаміки двофазного потоку на тарілчастому розкидачі розробленого пневмосепаруючого пристрою встановлено:

- швидкість сходу зернових частинок підвищується в 3,6 рази з 6,7 до 24 м/с при збільшенні кутової швидкості тарілчастого розкидача з 11,2 до 21,2 с⁻¹; зменшення насипної щільності зернової фази ЗС з 750 до 600 кг/м³ знижує її на 22%, з 6,7 до 5,2 м/с. При збільшенні діаметра тарілчастого розкидача з 0,5 до 0,6

м вона збільшується в 1,5 рази, з 6,7 до 9,8 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – зменшується на 43%, до 3,8 м/с;

- вид вільної поверхні залежить від кутової швидкості тарілчастого розкидача і насипної щільності зернової фази: зменшення кутової швидкості тарілчастого розкидача з 11,2 до 6,2 с⁻¹ призводить до утворення застійних зон поблизу осі обертання і збільшення висоти шару в 1,5 рази, з 0,048 до 0,074 м, а під час сходження – в 2,2 рази з 0,02 до 0,044 м. При зменшенні насипної щільності зернової фази з 750 до 600 кг/м³ висота шару в застійній зоні підвищується на 12,5%, з 0,048 до 0,054 м, а під час сходження – на 20%, з 0,02 до 0,024; при $\Omega \geq 16,2 \text{ с}^{-1}$ – утворення застійних зон відсутнє;

- швидкість сходу частинок легких домішок визначається рухом ЗС і зі зменшенням насипної щільності ЗС від 750 до 600 кг/м³ знижується на 18% з 6,2 до 5,1 м/с; при збільшенні діаметра ТР з 0,5 до 0,6 м швидкість сходу частинок домішок збільшується в 1,5 рази, з 6,2 до 9,2 м/с, а при зменшенні до 0,4 м – знижується на 37%, до 3,7 м/с; збільшення кутової швидкості ТР від 11,2 до 21,2 с⁻¹ підвищує її в 3,1 раз, з 6,2 до 19,5 м/с; збільшення розмірів частинок легких домішок від 1 до 3 мм зменшує її на 5%, з 6,5 до 6,15 м/с; збільшення насипної щільності частинок від 150 до 450 кг/м³ зменшує її на 6%, з 6,4 до 6 м/с.

3. Проведеним аналізом результатів математичного моделювання нелінійної динаміки потоку суцільного трифазного середовища «зерно – легкі домішки – повітряний потік» в основний кільцевої зоні пневмосепаруючого пристрою встановлено:

- вертикальна складова швидкості вилучених легких домішок з підвищенням кутової швидкості ТР з 11,2 до 16,2 с⁻¹ збільшується в 2,1 рази, з 1,5 до 3,2 м/с, на початку кільцевої зони і в 1,5 рази, з 1,9 до 2,9 м/с, в кінці; підвищення швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с збільшує V_{z_2} в 1,3 рази на початку кільцевої зони, з 1,6 до 2,1 м/с, і в 1,5 рази в кінці; збільшення насипної щільності фази домішок знижує її на 31%, з 2,6 до 1,8 м/с в кінці кільцевої зони; збільшення розмірів частинок з 1 до 3 мм знижує її в кінці

кільцевої зони очищення на 50%, з 3,2 до 1,6 м/с;

- траєкторії руху частинок дозволяють визначити можливість отримання і розрахункової ширини основної кільцевої зони. Збільшення кута β^* від 0° до 30° збільшує розрахункову ширину основної кільцевої зони в 1,4 рази, з 0,2 до 0,27 м, а при подальшому його збільшенні – витяг домішок на конструктивно обмеженій ділянці стає неможливим. Зменшення кута α^* з 45° до 15° збільшує її в 1,9 рази, з 0,14 до 0,27 м, а при $\alpha^* = 0^\circ$ – вилучення домішок стає неможливим.

4. Проведеним аналізом математичного моделювання псевдозрідженого шару зернової маси на конусно-каскадній поверхні пневмосепаруючого пристрою встановлено:

- об'ємна щільність зернової суміші монотонно зростає по глибині шару. Причому щільність зернової суміші із збільшенням швидкості повітряного потоку зменшується, що зумовлює роздування шару (збільшенню його висоти). Швидкість повітряного потоку також монотонно зростає з глибиною, що можна пояснити звуженням пор між зернами в нижніх областях шару. Тиск повітряного потоку для невеликих швидкостей із збільшенням висоти шару зростає. Це відповідає реальному розподілу тиску повітряного потоку у стані рівноваги;

- зі зростанням швидкості від 5 до 6 м/с об'ємна щільність по глибині шару в середньому зменшується на 0,01. Подальше її збільшення до 7 м/с змінює зміню об'ємної щільності впливає несуттєво. Об'ємна щільність змінюється від 0,64 (для щільної упаковки) до 0,532, після якої відбувається руйнування шару. При цьому висота шару збільшується на 0,005 м;

- зі збільшенням швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с надлишковий тиск у шарі збільшується на 12,3 %, з 650 до 730 Н/м². Це також відбувається через зміну об'ємної щільності шару за його глибиною;

- зі збільшенням еквівалентного розміру зернових частинок з 2,8 до 3,2 мм, надлишковий тиск у шарі збільшується на 48 %, з 540 до 800 Н/м².

5. Проведеним аналізом математичного моделювання нелінійної динаміки процесу очищення на конусно-каскадній поверхні ПСУ встановлено:

- з ростом швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с об'ємна щільність по глибині шару в середньому зменшується на 17%, з 0,64 до 0,534;

- швидкість повітряного потоку в міжзерновому просторі зменшується по глибині шару на 20-30%, з 15-19,5 до 11,5 -16,9 м/с;

- зі збільшенням швидкості повітряного потоку від 5 до 7 м/с при $a_1 = 0,003$ м надлишковий тиск в шарі збільшується на 12,3%, з 650 до 730 Па; зі збільшенням розмірів частинок зернової фази з 2,8 до 3,2 мм надлишковий тиск в шарі збільшується на 48%, з 540 до 800 Па;

- максимальна довжина стійкого шару головним чином визначається початковою швидкістю руху суміші зерна з домішкою, з її збільшенням від 0,5 до 1,5 м/с, L_{\max} збільшується в 6 разів, з 0,1 м до 0,6 м; при збільшенні швидкості повітряного потоку з 5 до 7 м/с вона зменшується на 12-14%, і на 14-17% при збільшенні α від 30° до 60° ; зі збільшенням β від 30° до 60° максимальна довжина стійкого шару збільшується на 59-68%;

- х-ва складова швидкості суміші зерна з домішками, що залишилися після основної очистки, по довжині скатної повітропроникної поверхні пневмосепаруючого пристрою збільшується в 2,3-5 разів, від 0,5-1,5 до 2,5-3,5 м/с;

- вертикальна складова швидкості частинок домішок, що вилучаються з шару, зменшується зі збільшенням їх розмірів і щільності; підвищення швидкості повітряного потоку збільшує її;

- ефективність процесу очищення збільшується з ростом швидкості повітряного потоку і для частинок $a_2 \leq 1,5$ мм з насипною щільністю фази домішки до 300 кг/м^3 збільшується в 1,5 рази; при ефективності $\eta \geq 0,7$ і швидкості повітряного потоку $V_{III} = 5$ м/с вилучаються частки $a_2 \leq 1,2$ мм, а при

$$V_{III} = 7 \text{ м/с} - a_2 \leq 2,5 \text{ мм.}$$

6. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено закономірності управління якістю та продуктивністю, виявлена і доведена реальна можливість суттєвої інтенсифікації процесу очищення ЗС від легких домішок розробленим пневмосепаруючого пристрою зі збільшеною основною кільцевою і додатковими зонами очищення на конусно-каскадній поверхні.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2

1. ДСТУ 2240-93. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови [Чинний від 1993-09-09]. К.: Держстандарт України, 1993. 73 с.
2. Тищенко Л.Н. Интенсификация сепарирования зерна. Харьков: Основа, 2004. 224 с.
3. Динамика виброцентробежной зерноочистки. / Тищенко Л.Н. и др. Харьков: Міськдрук, 2013. 440 с.
4. Сепаратор виброцентробежный зерноочистительный А1–БЦС–100. Паспорт. Житомир: Облполиграфиздат, 1990. 28с.
5. Сепаратор-ворохоочиститель самоходный СВС-25. Паспорт. Житомир: Облполиграфиздат, 2009. 35 с.
6. Теорія сепарування. / В.П. Ольшанський та ін. Харків: ХНТУСГ, 2018. 803 с.
7. Слипченко М.В. К производственным испытаниям ворохоочистителя СВС-15 с разработанным пневмосепарирующим устройством. *Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв: Вісник ХНТУСХ ім. Петра Василенка*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2009. Вип. 88.– С. 88-95.
8. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Т.1. М.: Наука, 1976. 536 с.
9. Тарапов И.Е. Механика сплошной среды. В 3-х ч. Ч.2: Общие законы

кинематики и динамики. Харьков: Золотые страницы, 2002. 516 с.

10. Тищенко Л.Н., Слипченко М.В. К составлению уравнений динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип. 41, Ч.1. С. 62-67.

11. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. 336 с.

12. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971. 536 с.

13. Кильчевский Н.А. Курс теоретической механики. Т.1. М.: Наука, 1972. 530 с.

14. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978. 575 с.

15. Парс Л.А. Аналитическая динамика. М.: Наука, 1971. 636 с.

16. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое / М.А. Гольдштик. – Новосибирск: СО АН СССР. Ин-т теплофиз., 1984. – 163 с.

17. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.

18. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико–механических свойств. М.: Колос, 1978. 238 с.

19. Kraszewski A.W., Nelson S.O. Wheat moisture content and bulk density determination by microwave parameters measurement. *Canadian agricultural engineering*. 1992. Vol. 34, No. 4. P 327- 335.

20. Кутепов А.М., Стерман Л.С., Стюшин Н.Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. 3-е изд., испр. М.: Высшая школа, 1986. 448 с.

21. Милн-Томсон Л.М. Теоретическая гидромеханика. М.: Мир, 1964. 655 с.

22. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука,

1978. 336 с.

23. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування насіння. Т.3, розділ 7. Харків: Око, 2006. 408 с.

24. Khoshtaghaza M., Mehdizadeh R. Aerodynamic properties of wheat kernel and straw materials. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript FP 05 007. 2006. Vol. VIII. P. 1-10.

25. Gürsoy S., Güzel E. Determination of physical properties of some agricultural grains. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2010. 2(5). P 492-498.

26. Tavakoli M. Moisture-dependent physical properties of barley grains. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*. 2009. Vol. 2 No.4. P. 84-91.

27. Adapa P.K., Tabil L.G., Schoenau G.J. Compaction characteristics of barley, canola, oat and wheat straw. *Biosystems Engineering*. 2009. Vol. 109. P. 335-344. doi:10.1016/j.biosystemseng.2009.06.022

28. Lam P.S., Sokhansanj S., Bi X. Bulk density of wet and dry wheat straw and switchgrass particles / P.S. Lam, S. Sokhansanj, Bi X. *Applied engineering in agriculture*. Vol. 24(3). P. 351-358.

29. Ünal H.G. Some physical and nutritional properties of hulled wheat. *Tarım bilimleri dergisi*. 2009. No 15 (1). P. 58-64.

30. Теоретична механіка : підручник / І. В. Кузьо та ін. Харків : Фоліо, 2017. 780 с.

31. Борисенко А. А. Дифференциальная геометрия и топология. X., Основа. 1995. 304 с.

32. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М.: Наука, 1974. 176 с.

33. Robbin J.W., Salamon D.A. Introduction to differential geometry. ETH: Zurich, 2020. 313 pp.

34. Борисенко А.И., Тарапов И.Е. Механика сплошной среды. Векторный анализ и начала тензорного исчисления (издание 6-е). В трех частях. Часть 1.

Харьков: Золотые страницы. 2003. 319с.

35. Hay G.E. Vector and Tensor analysis. Dover publications, inc.: New York, 1965. 193 p.

36. Тищенко Л.Н., Слипченко М.В. К составлению уравнений динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин.* Кіровоград: КНТУ, 2011. Вип. 41, Ч.1. С. 62-67.

37. Contributors to Wikimedia projects. Einstein notation - Wikipedia. Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Einstein_notation (date of access: 27.02.2023).

38. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1973. 847 с.

39. Векуа И.Н. Основы тензорного анализа и теории ковариантов. М.: Наука, 1978. 296 с.

40. Мак-Коннел А.Дж. Введение в тензорный анализ. М.: Физматгиз, 1963. 412 с.

41. Погорелов А.В. Лекции по дифференциальной геометрии. Харьков: Изд-во Харьковск. гос. ун-та, 1967. 163 с.

42. Горшков. А.Г., Рабинский Л.Н., Тарлаковский Д.В. Основы тензорного анализа и механика сплошной среды. М.: Наука, 2000. 214 с.

43. Бояджиев Х., Бешков В. Массоперенос в движущихся пленках жидкости. М.: Мир, 1988. 136 с.

44. Ольшанський В.П., Ольшанський С.В. Континуальні моделі зерно потоків на віборешета. Харків: Міськдрук, 2017. 224 с.

45. Savage S.B., Jeffrey D.J. The stress tensor in a granular flow at high shear rates. *Journal of Fluid Mech.* 1981. Vol. 110. P. 225-272. <https://doi.org/10.1017/S0022112081000736>

46. Savage S.B. Analyses of slow high-concentration flows of granular materials. *Journal of Fluid Mechanics.* 1998. Vol. 377, 1-26.

doi:10.1017/S0022112098002936

47. Vermeer P., Diebels S., Ehlers W. eds. Continuous and Discontinuous Modelling of Cohesive-Frictional Materials. Berlin: Springer-Verlag, 2001. 307 pp

48. Dolgunin V.N., Kudi A.N., Tarakanov A.G. Structural inhomogeneity and effects of separation by size and density in gravity flow of granular materials. *J Eng Phys Thermophy*. 2022. 95. P. 484–494. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02505-y>

49. Цытович Н.А. Механика грунтов. М.: Гос. издат. лит. по строительству, архитект. и стройматер., 1963. 636 с.

50. Сэвидж С. Гравитационное течение несвязанных гранулированных материалов в лотках и каналах. Механика гранулированных сред: теория быстрых движений: сб. ст.; пер. с англ. М.: Мир, 1985. С. 86-146.

51. Dolgunin V.N., Borshchev V.Y., Ivanov, P.A. Rapid gravity flow of a granular medium. *Theor Found Chem Eng*. 2005. Vol. 39. P. 548–554. <https://doi.org/10.1007/s11236-005-0115-3>

52. Jenkins J.T., Savage S.B. A theory for the rapid flow of identical, smooth, nearly elastic, spherical particles. *J. Fluid Mech*. 1983. Vol. 130. P 187–202.

53. Malvern L.E. Introduction to the mechanics of a continuous medium. New York: Prentice Hall, 1969. 713 p.

54. Fang T., Wang F., Gao B. Liquid film flow over an unsteady moving surface with a new stretching velocity. *Physics of Fluids*. 2018. Vol. 30, 093603. <https://doi.org/10.1063/1.5046479>

55. Benilov E.S. The dynamics of liquid films, as described by the diffuse-interface model. *Physics of Fluids*. 2020. Vol. 32, 112103 <https://doi.org/10.1063/5.0027152>

56. Тищенко Л.Н., М.В. Слипченко. Уравнения динамики зерновой смеси на тарельчатом разбрасывателе виброцентробежного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 1 (65). С. 123-127.

57. Бугров Я.С. Высшая математика: Учеб.для вузов: в 3 т.–5-е изд., стер. / Я.С. Бугров, С.М. Никольский. – М.: Дрофа, 2003 – Т.2. Дифференциальное и

интегральное исчисление. – 509 с.

58. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Учеб. для вузов: в 3-х томах – 8-е изд. / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит., 2001. – Т.1. – 697 с.

59. Скрипник І.О., Пісарькова І.О., Петренко М.М. Механічне травмування насіння. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2018. Вип. 48. С. 143-153. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2018.48.143-153>

60. Feizollah S., Feizollah R. Mechanical damage to corn seeds. *Cercetari agronomice in moldova*. 2018. Vol. LI, No 3(175). P. 1-12. DOI:10.2478/cerce-2018-0021

61. Feizollah S., Valizadeh S., Dowlatshah A. Mechanical damage to wheat and triticale seeds related to moisture content and impact energy. *Agric Eng Int: CIGR Journal*. 2012. Vol.14(4). P. 150–155.

62. ДСТУ 3768:2019 Пшениця. Технічні умови [Чинний від 10.06.2019]. К.: ДП УкрНДНЦ, 2019. 21 с.

63. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Колебания зерновых потоков на виборешета. Харьков: Міськдрук, 2012. 267 с.

64. Гончаров Є.С. и др. Машины для очищения та обробки зерна. К.: Урожай, 1966. 204 с.

65. Гончаров Е.С. Рациональная скорость вращения вертикальных цилиндрических виброцентробежных решет. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. К.: Урожай, 1976. Вып. 36. С. 55-61.

66. Гончаров Е.С. Универсальные виброцентробежные зерновые сепараторы. *Тракторы и сельхозмашины*. 1984. № 1. С. 15-17.

67. Gilles D., Jacques V., Daniel L.. Stokes force on a cylinder in the presence of fluid confinement [Preprint submitted on 23 Nov 2020]. 2020. [ffhal-03020477](https://arxiv.org/abs/2011.11111)

68. Amina M. Sedimentation of particles in Stokes flow. [Preprint submitted on 3 Feb 2020] 2020. [ffhal-01824278v2f](https://arxiv.org/abs/2002.00001)

69. Тищенко Л.Н., Слипченко М.В. Экспериментальное определение коэффициента динамической вязкости засоренного воздушного потока при очистке зерновых смесей пневмосепарирующим устройством. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3 (67). С. 138-143.

70. Прандтль Л. Гидроаэродинамика [пер. с нем.]. М.: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2000. 576 с.

71. Elger D.F. and other Engineering fluid mechanics. (12th Edition). Wiley, 2019. 496 p.

72. Паспорт на преобразователь сигналов тензорезисторных датчиков в стандартный сигнал ГСП типа ПА-1. 4УЭ.036.006 ПС. Краснодар: ООП ВЦ, 1982. 16 с.

73. Ситніков О.В. Числові методи: конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. Київ: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2019. 165с.

74. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2001 – 630 с.

75. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

76. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.

77. Goeken D., Johnson O. Fifth-order Runge-Kutta with higher order derivative approximations. 15th Annual conference of applied mathematics, Univ. of Central Oklahoma, Electronic journal of differential equations, Conference 02. 1999. P. 1–9.

78. Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения. М.: Наука, 1967. 368 с.

79. Epperson J.F. An introduction to numerical methods and analysis. (second edition). New Jersey: Hoboken, 2013/ 591 p.

80. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аэрозольного потокуаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Ленинград: Химия, 1968. 510 с.

81. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
82. Chao Zhu, New Jersey Institute of Technology, Liang-Shih Fan, Ohio State University, Zhao Yu, Eli Lilly and Company Dynamics of Multiphase flows. Cambridge University Press, 2021. 594 p. <https://doi.org/10.1017/9781108679039>
83. Jefferey D.J., Acrivos A. The rheological properties of suspensions of rigid particles. *AIChE Journal*. 1976. Vol. 22., No. 3. P. 417-432. <https://doi.org/10.1002/aic.690220303>
84. Hyoung J. Choi, Stephen J. Vinay, Myung S. Jhon Rheological properties of particle suspensions in a polymeric liquid. *Polymer Communication*. 1999. Vol. 40. P. 2869–2872.
85. Schmidt M. Rheological properties of suspensions with spherical particles in shear and elongational flows. *Applied Rheology*. 2001. Vol. 11. P. 220-227. [10.1515/arh-2001-0013](https://doi.org/10.1515/arh-2001-0013).
86. Gallegos C., Franco J.M. Rheology of food emulsions. *Rheology Series*. 1999. Vol. 8., P. 87-118. [https://doi.org/10.1016/S0169-3107\(99\)80028-8](https://doi.org/10.1016/S0169-3107(99)80028-8)
87. Голованов Ю.В., Ширко И.В. Обзор современного состояния механики быстрых движений гранулированных материалов. В кн. Механика гранулир. сред. Теория быстрых движений. М.: Мир, 1985. С. 86-146.
88. Николаевский В.Н. Определяющие уравнения пластического течения зернистых материалов. *ПММ*. 1963. Вып. 3, Т.27. С. 124-127.
89. Гудмен М. Две задачи о гравитационном течении гранулированных материалов. В кн. Механика гранулированных сред: Теория быстрых движений / М. Гудмен, С. Коун. – М.: Мир, 1985. – С. 64-85.
90. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды / В.В. Соколовский. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
91. Kuo-Ching C., Jeng-Yin L. Microcontinuum derivation of Goodman–Cowin theory for granular materials. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 2008. Vol.

20. P.33-345. 10.1007/s00161-008-0085-x.

92. Bouchut F., Fernández-Nieto E.D., Mangeney A., Narbona-Reina G. A two-phase shallow debris flow model with energy balance. *ESAIM: Mathematical modelling and numerical analysis*. 2015. Vol. 49. P. 101–140. <https://doi.org/10.1051/m2an/2014026>

93. Xu X., Jiaminag C., Ligang T. and other Fluidization characteristics of air dense medium agitated separation fluidized bed with different distributors. *Mineral processing and extractive metallurgy review*. 2019. P. 299-306. <https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1643342>

94. Shilton N.C., Niranjana K. Fluidization and its applications to food processing. *Food structure*. 1993. Vol. 12. P. 199-215.

95. Ramakers B. J., Ridder R., Kerkhof P. J.A.M. Fluidization behavior of wood/sand mixtures. *Maderas. Ciencia y tecnología*. 2004. Vol 6, No 2. P. 145-153. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2004000200005>

96. Заика П.М. Вибрационные семяочистительные машины и устройства. М.: МИИСП, 1981. 141 с.

97. Тищенко Л.Н., Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Гидродинамика сепарирования зерна. Харків : Міськдрук, 2010. – 174 с.

98. Pokusaev, B.G., Karlov, S.P., Nekrasov, D.A. et al. Initiation of convection flows in the wall granular layer in the problem of boiling of subcooled coolant. 2016. *High Temp*. Vol. 54. P. 708–715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X16040180>.

99. Massoudi M., Mehrabadi M.M. Implicit continuum mechanics approach to heat conduction in granular materials. *Industrial & engineering chemistry research*. 2010. Vol 49, Num 11. P. 5215-5221.

100. Гольдштик М.А. Элементарная теория кипящего слоя. *ПМТФ*. 1972. №6. С. 106-112.

101. Гольдштик М.А., Козлов Б.Н. Элементарная теория концентрированных дисперсных систем. *ПМТФ*. 1973. №4. С. 67-77.

102. Мясников В.П. Кинетическая модель процессов теплопереноса в

кипящем слое *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1967. №4. С. 84-90.

103. Peng Z., Moghtaderi B., Doroodchi E. A simple model for predicting solid concentration distribution in binary-solid liquid fluidized beds. *AIChE Journal*. 2017. Vol. 63 (2). P. 469-484. doi:10.1002/aic.15420

104. Zhang, J., Grace, J.R., Epstein, N. Flow regime identification in gas-liquid flow and three-phase fluidized beds. *Chemical engineering science*. 1997. Vol. 52. P. 3979-3992.

105. Тищенко Л.Н., Слипченко М.В. К исследованию динамики продуваемого слоя зерновой смеси. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Мелітополь: ТДАТУ, 2010. Вип. 10, Т.7. С. 201-209.

106. Dias R.P., Teixeira J.A., Mota M.G., Yelshin A.I. Particulate binary mixtures: dependence of packing porosity on particle size ratio. *Ind. Eng. Chem. Res*. 2004. Vol. 43. P. 7912-7919.

107. Gan M., Gopinathan N., Jia X., Williams R.A. Predicting packing characteristics of particles of arbitrary shapes. *КОРА*. 2004. No. 22. P. 82-93.

108. Leroy O., Perrin J., Jolly J. et al. Thermal accommodation of a gas on a surface and heat transfer in CVD and PECVD experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. Vol. 30. P.499-509.

109. Zhang W., Thompson K.E., Reed A.H., Beenken L. Relationship between packing structure and porosity in fixed beds of equilateral cylindrical particles. *Chemical engineering science*. 2006. Vol. 61. P. 8060-8074.

110. Rettinger, C., Rüde, U., Vollmer, S. et al. Effect of sediment form and form distribution on porosity: a simulation study based on the discrete element method. *Granular Matter*. 2022. Vol. 24, No 118. P. 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01275-x>

111. Seckendorff J., Hinrichsen O. Review on the structure of random packed-beds. *The Canadian journal of chemical engineering*. 2020. Vol. 99, Is. S1. P. 703-733.

112. Wouterse A., Williams S., Philipse A. Effect of particle shape on the density and microstructure of random packings. *Journal of physics. Condensed matter*. 2007. Vol. 19. P.1-13. DOI:10.1088/0953-8984/19/40/406215.

113. Averardi A., Cola C., Zeltmann S.E., Gupta N. Effect of particle size distribution on the packing of powder beds: A critical discussion relevant to additive manufacturing. *Materials today communications*. 2020. Vol. 24. P. 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100964>

114. Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам – М.: Мир, 1981.– 408 с.

115. Reddy J.N. An introduction to continuum mechanics (second edition). Cambridge university press, 2013. 470 p.

116. Бойко А.В. Гідрогазодинаміка : підручник. Х.: НТУ ХПІ, 2007. 444 с.

117. Mendez, Y. The single particle motion of non-spherical particles in low Reynolds number flow. *Fluids*. 2022 Vol. 7, No 320. P. 1-16. <https://doi.org/10.3390/fluids7100320>

118. Eeten K.M.P Hydrodynamics of rotating multiphase flows Eindhoven. University of Technology, 2014.

119. Hagemeyer T., Thevenin D., Richter T. Settling of spherical particles in the transitional regime. *International journal of multiphase flow*. 2021. Vol. 138. P. 1-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2021.103589>.

120. Manninen M., Taivassalo V., Kallio S. On the mixture model for multiphase flow. Technical research centre of Finland, VTT Publications, 1996. 67 p.

121. Базаров И.П. Термодинамика. М.: Высшая школа, 1983. 344 с.

122. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. М.: Машиностроение, 1972. 670 с.

123. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Техническая термодинамика: [Учебное пособие для вузов] М.: Высшая школа, 2000. 261 с.

124. Rajput R.K. Engineering thermodynamics (third edition). New Delhi: Laxmi publications, 2007. P. 943.

125. Leroy O., Perrin J., Jolly J., Pealat M., Lefebvre M. Thermal accommodation of a gas on a surface and heat transfer in CVD and PECVD experiments. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. Vol. 30. P.499-509.

126. Shiraiwa M, Pöschl U. Mass accommodation and gas–particle partitioning in secondary organic aerosols: dependence on diffusivity, volatility, particle-phase reactions, and penetration depth. *Atmospheric chemistry physics*. 2021. Vol. 21, Is. 3. P. 1565–1580. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1565-2021>

127. Julin, J., Winkler, P.M., Donahue, N.M., Wagner, P.E., Riipinen, I.A. Near unity mass accommodation coefficient of organic molecules of varying structure. *Environ. Sci. Technol.* 2014. Vol. 48. P. 12083–12089. <https://doi.org/10.1021/es501816h>

128. Ching E, Barnhardt M., Ihme M. Sensitivity of hypersonic dusty flows to physical modeling of the particle phase. *Journal of spacecraft and rockets*. 2021. Vol. 58, No 3. P. 1-15. <https://doi.org/10.2514/1.A34810>

129. Тихонов А.Н., Васильева А.Б., Свешников А.Г. Дифференциальные уравнения. М.: Наука, 1985. 231 с.

130. Каліон В. А. Обчислювальна гідромеханіка. Рівняння Нав'є – Стокса : навч. посіб. К.: Видавничо-поліграфічний центр Київський університет, 2016. 221 с.

131. Haines B.M. Mazzucato A.L. A proof of Einstein's effective viscosity for a dilute suspension of spheres. *SIAM Journal on mathematical analysis*. 2012. Vol/ 44. Is. 3. P. 2120-2145. DOI: 10.1137/100810319

132. Höfer R. M., Schubert R. The influence of Einstein's effective viscosity on sedimentation at very small particle volume fraction. *Annales de l'Institut Henri Poincaré C, Analyse non linéaire*. 2021. Vol. 38, Is. 6. P. 1897-1927. <https://doi.org/10.1016/j.anihpc.2021.02.001>

133. Тищенко Л.Н., Слипченко М.В. Динамика извлечения легких примесей пневмосепарирующим устройством виброцентробежного сепаратора. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2011. № 1 (61). С. 186-193.

134. Домбровський В.А., Крижанівський І.М., Мацьків Р.С. та ін. Вища математика: Підручник. / за ред. Шинкарика М.І. Тернопіль: Видавництво Карп'юка, 2003. 480с

135. Schwedes J. Review on testers for measuring flow properties of bulk solids. *Granular Mater.* 2003. Vol. 5, No 1. P. 1-43. DOI:10.1007/S10035-002-0124-4

136. Giovine P., Capriz G., Mariano P.M., Giovine P. et al. An extended continuum theory for granular media. *Mathematical models of granular matter. Lecture notes in mathematics.* Vol. 1937. Berlin: Springer, Heidelberg, 2008. P. 167–192. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78277-3_8

137. Petit J.C., Marín J.F., Trujillo L. On the construction of a continuous theory for granular flows. *computational and experimental fluid mechanics with applications to physics, engineering and the environment. Environmental science and engineering.* 2014. Springer, Cham. P. 463-471. https://doi.org/10.1007/978-3-319-00191-3_32

138. Larsson S., Rodríguez Prieto, J.M., Gustafsson G. et al. The particle finite element method for transient granular material flow: modelling and validation. *Comp. Part. Mech.* 2021. Vol. 8. P. 135–155. <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00317-6>

139. Wu Y.H., Hill J.M., Yu A. A finite element method for granular flow through a frictional boundary. *Commun nonlinear sci numer simul.* 2007. Vol. 12(4). P. 486-495. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2005.04.005>.

140. Berzi D., Jenkins J.T., Richard P. Extended kinetic theory for granular flow over and within an inclined erodible bed. *Journal of Fluid Mechanics.* 2020. Vol. 885. <https://doi.org/10.1017/jfm.2019.1017>

141. Bharathraj S., Kumaran V. Effect of particle stiffness on contact dynamics and rheology in a dense granular flow. *Phys. Rev. E.* 2018. Vol 97, No 1. P/ 1-15/ DOI: 10.1103/PhysRevE.97.012902

142. Bui T.T., Le A.D. Determination on fluidization velocity types of the continuous refined salt. In *Current drying processes*, 2020. DOI: 10.5772/intechopen.92077

РОЗДІЛ 3

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ КУКУРУДЗИ ЗА РОЗМІРАМИ ЗЕРНІВОК

Виробництво кукурудзи в Україні сягає 36,5 млн. тон на рік. Кукурудза є беззаперечним лідером серед культур в Україні, оскільки вона є універсальною та найбільш урожайною культурою, практично всі частини якої використовуються у сільськогосподарському виробництві, харчовій промисловості, медицині, для виробництва біоетанолу, фільтрів, біорозкладних пластикових пакетів тощо. Кукурудза очищує ґрунти від бур'янів та є ефективним попередником сівозміни.

Очищення та калібрування кукурудзи – є найважливішими технологічними операціями у процесі підготовки насінневого матеріалу. Збирання культури відбувається на етапі стиглості, коли вологість досягає 35%. Засміченість зернового вороху може сягати 15-20% [1]. Велика кількість домішок підвищує початкову вологість матеріалу.

Аналізом відомих досліджень встановлено, що машини та обладнання не в повній мірі задовольняють сучасним потребам отримання високих урожаїв.

Відсутність ефективних засобів для калібрування кукурудзи спонукає розроблення нових та модернізацію існуючих високопродуктивних робочих поверхонь.

3.1. РЕШЕТА ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ КУКУРУДЗИ З ОТВОРАМИ У ФОРМІ ОВАЛУ КАССІНІ

Технологічні лінії очищення та калібрування кукурудзи передбачає декілька робочих циклів з насінневим матеріалом. Оскільки збільшення технологічних операцій підвищує травмованість насінневого матеріалу, покращення ефективності робочих поверхонь (решіт), що реалізують процес

очищення та калібрування є ефективним напрямком досліджень.

До зерноочисних машин висунуто ряд вимог: зменшення кількості циклів взаємодії зернівок з робочими органами сепараторів, зниження ступеня травмування насіння, ресурсозбереження процесу сепарації і калібрування.

Для очищення та калібрування кукурудзи широко використовують сепаратори БСХ Хорольського механічного заводу (рис. 3.1) , що споряджено решетами з круглими отворами, різного діаметру, які обираються в залежності від технологічної операції.



Рис. 3.1. Сепаратор БСХ – 100 Хорольського механічного заводу

Принцип роботи сепаратора БСХ – 100: зерновий ворох через приймальний патрубок потрапляє до розподільника де розподіляється на два потоки та рухається до кузова, що здійснює кругові рухи. Матеріал переміщується вздовж решета та сортується за розмірними характеристиками відповідного решета.

Для очищення та калібрування кукурудзи використовують решета з діаметром отвору 10-12 мм., або з продовгуватими отворами (рис. 3.2.а., в.).

Недоліком такого решета є відносно мала сумарна площа живого перетину, яку значно зменшують перемички між отворами.

Проблему інтенсифікації процесу калібрування та сепарації частково було вирішено дослідженнями С.О. Харченко, який запропонував інноваційні решета з можливістю активації процесу сапарації [2 – 5] (рис.3.2.б., г.).

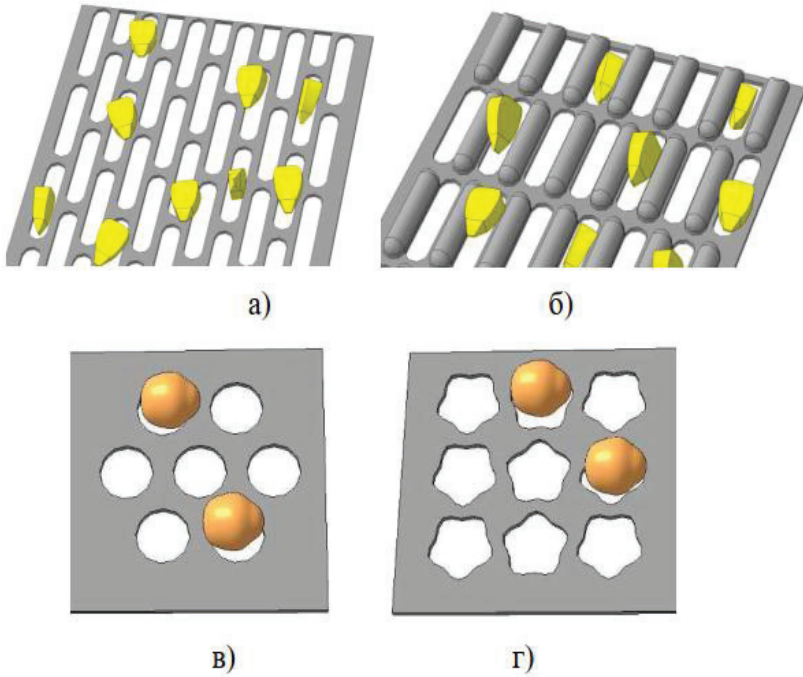


Рис. 3.2. Решета: а) – традиційне з продовгуватими отворами; б) – з об'ємними активаторами; в) – традиційне з круглими отворами; г) – з пятипелюстковими отворами

Об'ємні активатори, або пятипелюсткова форма отворів надає можливість орієнтувати насіння для збільшення проходу зернівок крізь отвори.

Однак, аналіз показав, що існуючі решета не в повній мірі задовольняють сучасним вимогами до процесу сепарації і калібрування насіння кукурудзи.

Недоліком існуючих решіт є недостатня проникність зернівок крізь отвори, що пояснюється хаотичним переміщенням зернівок вздовж поверхні решета.

Для вирішення задачі запропоновано решето з отворами у формі овалу Кассіні [6, 7] (рис. 3.3).

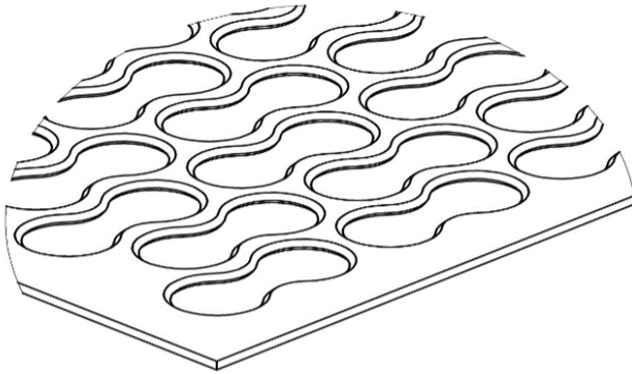


Рис. 3.3. Решето з отворами у формі овалу Кассіні

Овал Кассіні – крива, яка є геометричним місцем точок, добуток відстаней від двох заданих точок (фокусів) є сталим і дорівнює квадрату деякого числа a . Овал є лемніскатою з двома фокусами та описується рівняннями кривої четвертого порядку .

Хвилеподібна форма отвору дозволяє максимально близько розташовувати отвори один до одного без зменшення ступеню жорсткості решета (рис. 3.4). Задача вирішується шляхом того, що отвори, запропонованої форми, мають змінний перетин. Це надає частинкам матеріалу простір для маневрування із урахуванням взаємних зіткнень між частинками, що знижує заклинювання у отворах до мінімуму. Також змінний переріз перетину,

запропонованого отвору, дає можливість усереднювати різноманітність форми частинок матеріалу. За рахунок плавного хвильового переходу однієї половини овалу у другу травмування частинок у вигляді механічних здирань зведено до мінімуму.

Під час роботи зерновий матеріал, переміщуючись по робочій поверхні, калібрується таким чином, що зернівки, які мають розмір менший за розмір отвору решета, проходять у отвори. Частинки більшого розміру проходять по поверхні решета та потрапляють до сходової фракції. Змінний перетин отвору решета дозволяю додаткове місце для маневру та орієнтації по відношенню до отвору.

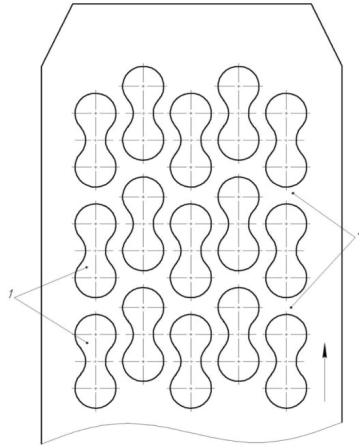


Рис. 3.4. Розташування отворів у формі овалу Кассіні: 1) – отвори; 2) – перемички

Овал Кассіні наведено на рис. 3.5.

За означеннями овалу Кассіні, добуток відстаней від фокусів до точки M дорівнює a . Для вибору раціональної форми отвору решета необхідною умовою є – крива овалу повинна бути гладкою і не мати кутових точок, які можуть призвести до забивання отворів решета.

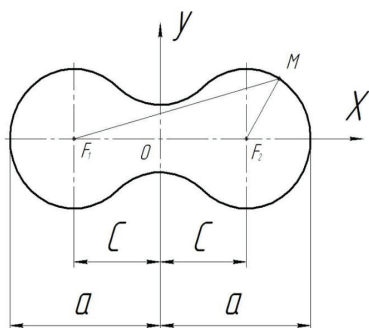


Рис. 3.5. Овал Кассіні:

де: X та Y – координати;

M – поточна точка овалу Кассіні;

F_1, F_2 – фокуси овалу Кассіні з координатами a ;

C – половина відстані між фокусами.

Для заданого значення X побудовано таблицю для визначення параметру C при обраному значенні a .

Таблиця 3.1

λ	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	4
C	0,952a	0,91a	0,87a	0,83a	0,8a	0,75a	0,74a	0,714a

За допомогою таблиці, що наведена, можна обрати решето з отворами, що відповідають розміру частинок зернового матеріалу.

У якості модифікації інноваційного решета кромку отвору запропоновано лійкоподібної форми, що додатково орієнтує зернівку до проникнення у отвір (рис. 3.6).

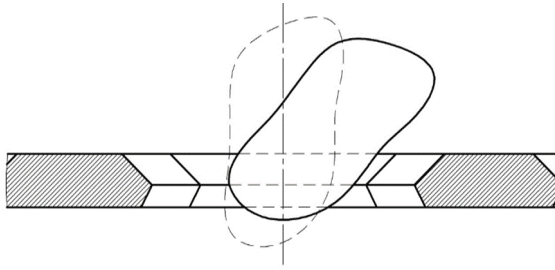


Рис. 3.6. Структура отвору з лійкоподібною кромкою

Для інтенсифікації пошарового руху насіння до отворів запропоновано модифікацію решета з направляючими каналами (рис. 3.7).

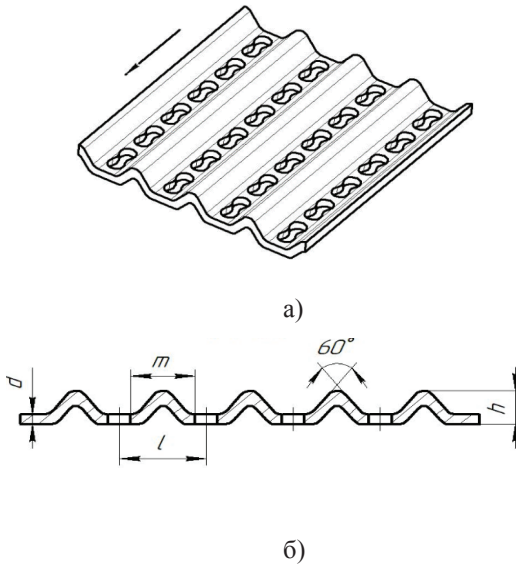


Рис. 3.7. Модифіковані решета з направляючими каналами:

де: d – товщина решета;

m – ширина виступу;

l – відстань між центрами отворів;

h – висота.

3.1.1. Лабораторні та виробничні випробування решета з отворами у формі овалу Кассіні

Випробування проводились у Державній науковій установі «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого» (Харківська філія) протокол на серійному сепараторі БСХ-100. Об'ємна маса кукурудзи варіювалась в залежності від партії від 680 до 820 кг/м³, вологість – від 16 до 25%. Вміст домішок, що відокремлювались – від 3 до 10%. Відповідно, експлуатаційна продуктивність машини, завдяки неоднорідності партій, змінювалась від 33 до 54 т/г.

Ступінь забиваємості отворів решіт у формі овалу Кассіні визначалась після одинадцяти годин безперервної роботи сепаратора у елеваторному режимі на етапі попередньої очистки. Машину зупиняли, виймали верхній ярус решітних рамок (лист перфорації різної геометрії прикручений до рамки). Конструктивно кожен рядок було розділено на сектори. Загальна кількість секторів на рамці складала 15 штук. Після закінчення кожної зміни безперервної роботи, протягом 10 днів, визначалась кількість отворів, що забито (рис. 3.8).

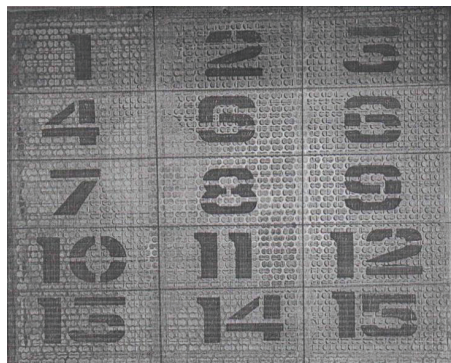


Рис. 3.8. Дослідне решето з секторами

Знімалися інформація що до: загальна кількість отворів, кількість забитих отворів. Сектори на яких виконувались дослідження обирались довільно у шаховому порядку, горизонтально та вертикально по три сектори для кожного дослідження.

Дані, що отримано заносились до таблиці 3.2, де фіксувалась дата проведення дослідю.

Таблиця 3.2

Дата	Номер обраного сектору		Кількість забитих отворів сектора (шт.)		Загальні кількість отворів сектора (шт.)	
	Кассіні	Кругле	Кассіні	Кругле	Кассіні	Кругле
19.10.22	10	1	2	15	110	186
	11	5	1	12	110	186
	12	9	2	19	110	186

Під час дослідів було враховано коефіцієнт, що залежить від культури зерна, вологості, вмісту домішки, яка відокремлюється (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

При вологості, %														
До 16			16-18			18-20			20-22			22-25		
Вміст домішки, %														
3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10	3	5	10
1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,55	0,55	0,55

Порівняння ступеню забиваємості величини живого перетину проводились по відношенню до стандартного решета розміром 770 на 990 мм. з круглими отворами діаметром 12 мм. Живий перетин решета з круглими отворами становить 41%, а живий перетин решета з отворами у формі овалу Кассіні – 63%. Відповідно запропоновані решета мають більший живий перетин, що збільшує пропускну спроможність решіт.

Для перевірки на адекватність теоретичних припущень, було розроблено експериментальний сепаратор, на якому було встановлено решета з отворами у формі овалу Кассіні.



Рис.3.9. Загальний вид лабораторної установки



Рис. 3.10. Лабораторна установка для лабораторних досліджень решіт з отворами у формі овалу Кассіні

Було обрано три основні фактори, що підлягали варіюванню: частота обертання решета (n , об/хв), питома подача матеріалу (Q , кг) та кут нахилу решета (α , град.). У таблиці 3.4. наведено значення рівнів та інтервалів варіювання.

Таблиця 3.4.

Фактор			Рівні варіювання факторів			Інтервал	Розрахунок
Найменування	Позначення		+1	0	-1		
	Природне	Кодоване					
Частота обертання n , хвил ⁻¹	X_1	x_1	350	300	250	50	$x_1 = \frac{n - 300}{50}$
Питома подача насіння Q , кг/хвил.	X_2	x_2	4	3	2	1	$x_2 = \frac{Q - 3}{1}$
Кут нахилу, α	X_3	x_3	10	8	6	2	$x_3 = \frac{\alpha - 8}{2}$

Повторність дослідів:

$$G_{расч} = \frac{S_u^2 \max}{N \sum_{u=1}^2 S_u^2} \leq G(0,05; f_1; f_2) \quad (3.1)$$

Дисперсія, що характеризує розсіюваність результатів дослідів на u -тому співвідношенні факторів:

$$S_u^2 = \frac{p=1 \sum_{m=1}^m (y_{ui} - \bar{y}_i)^2}{m - 1} \quad (3.2)$$

За результатами розрахунків коефіцієнтів регресії одержано рівняння у вигляді:

$$y = 2,95 + 0,13x_1 - 0,0058x_2 - 0,005x_3 + 0,06x_{12} + 0,08x_{13} + 0,57x_{23} - 0,71x_1^2 - 0,17x_2^2 - 0,62x_3^2 \quad (3.3)$$

Для обробки результатів, що одержані при вивченні поверхонь відгуку використовувався метод двомірних перетинів.

Найбільше практичне значення впливу факторів на процес калібрування частинок матеріалу має двомірний перетин поверхні відгуку, що характеризує прохід зернівок крізь отвори решета в залежності від частоти обертів та питомої подачі матеріалу.

Підставивши варіативні значення критеріїв варіювання було одержано поверхні відгуку (рис.3.11., рис. 3.12.).

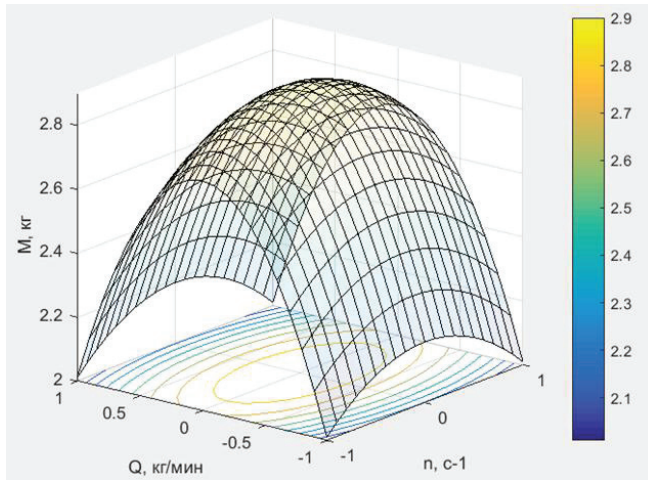


Рис. 3.11. Двомірний перетин поверхні відгуку, що характеризує прохід зернівок кукурудзи при $x_3=0$

Проаналізувавши рис.3.9., встановлено, що максимальне значення проходу зернівок кукурудзи відбувається при частоті обертання решета $n = 290,35 \text{ с}^{-1}$ та питомій подачі матеріалу $Q = 3,06 \text{ кг/хв}$.

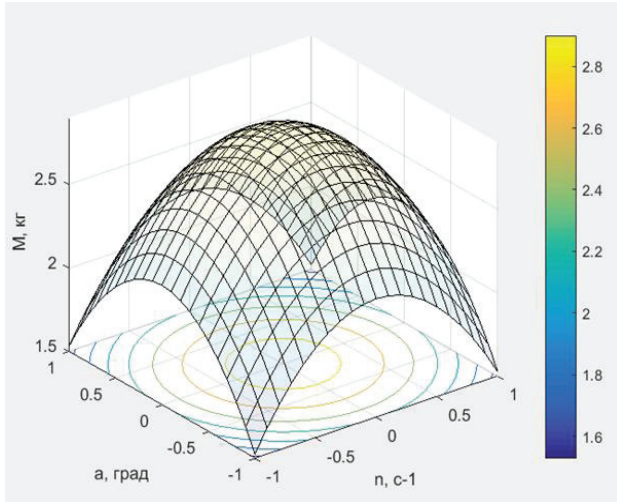


Рис. 3.12. Двовірний перетин поверхні відгуку, що характеризує прохід зернівок кукурудзи при $x_3=0$

Аналіз рис. 3.12. дозволив встановити, що максимальний прохід зернівок кукурудзи відбувається при частоті обертання $n=290,8 \text{ с}^{-1}$ та кута нахилу решета $\alpha = 7,9 \text{ град}$.

Висновки до розділу 3

1. Запропоноване решето з отворами у формі овалу Кассіні має на 20% більший живий перетин ніж решета, що використовуються.
2. Забиваємість запропонованого решета в три рази менша ніж решета з круглими отворами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Дерев'яно Д.А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування та якість насіння. Житомир, 2015. 773 с.
2. Kharchenko S., Zavgorodniy A., Kharchenko F., Kovalishin S., Mikhaylov Y. Effective sifting of flat seeds through sieve. INMATEH-Agricultural Engineering, V. 58. N. 2. P. 17-26.
3. Харченко С.О. Концепція інтенсифікації процесів віброрешітного просіювання зернових сумішей: дис. ...докт.тех.наук: 05.05.11. Харків, 2017. 332 с.
4. Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. V. 2, N. 7. P. 80-89.
5. Sergei Kharchenko, Andriy Barsuk, Nurlana Karimova, Alexander Nanka, Yevhen Pelypenko, Vadim Shevtsov, Ivan Morozov, Vladimir Morozov. Mathematical model of the mechanical properties of Ti-alloyed hypoeutectic cast iron for mixer blades. EUREKA: Physics and Engineering,(3). P. 99-110.
6. Мишкінс В.П., Швачич Г.Г., Коноваленков В.С., Заборова Т.М., Христян В.І. Вища математика. Дніпропетровськ, 2013. 424 с.
7. Сито для калібрування сипких матеріалів: пат. 150092 Україна: МПК В07В 1/46, u2021 04691. Заявл. 16.08.2021; опубл. 29.12.2021, Бюл. № 52. 4 с.

РОЗДІЛ 4

ТЕХНОЛОГІЯ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

На етапі прикінцевої обробки насіннєвого матеріалу, найвищу ефективність при виділенні повноцінного, біологічно активного насіння з підвищеним біологічним потенціалом показали машини, які розділяють насіннєвий матеріал за густиною насіння. Використовуючи, густину насіння, як ознаку ділимості, ефективно видаляються домішки, що важко відокремлюються: хворе, ушкоджене шкідниками, або травмоване зерно, та насіння бур'янів і інших культур, яке не відрізняється за геометричними розмірами від основної культури.

Широкого впровадження набули два способи розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння: розділення у рідинах – «вологий» і розділення псевдорозрідженому шарі – «сухий».

Розділення у рідинах дозволяє досягти найвищу гостроту розділення. Недоліком такого способу розділення є необхідність просушування насіння після його розділення, що суттєво збільшує собівартість процесу, тому широкого розповсюдження сепаратори «вологого» типу не отримали.

Найбільше поширення отримав «сухий» спосіб розділення насіннєвого матеріалу за густиною у псевдорозрідженому шарі, який утворюється шляхом дії на матеріал однієї або декількох сил: вібраційний – дія на насіннєвий матеріал вібрації робочої (опорної) поверхні; пневматичний – дія на насіннєвий матеріал повітряного потоку; вібропневматичний – одночасна дія на матеріал вібрації робочої поверхні та повітряного потоку; пневмовідцентровий – одночасна дія на матеріал повітряного потоку та відцентрової сили; вібропневмовідцентровий – одночасна дія на насіннєвий матеріал вібрації робочої поверхні, повітряного потоку та відцентрової сили.

Наукові дослідження з оптимізації кінематично-конструктивних параметрів розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння, є актуальними.

4.1. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕГРЕГАЦІЇ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

4.1.1. Аналіз попередніх досліджень процесу

Машини для розділення матеріалів за густиною насіння мають циліндричну, трапецієвидну, ступінчасту та плоску форму.

Перший вібропневматичний сепаратор для розділення матеріалів за власною густиною у псевдорозрідженому шарі було розроблено у 1897 р. Wolter Steele, Edward Steele і Henry Sutton (США) для збагачення корисних копалин [1]. Конструкція столу передбачала деку у формі трапеції.

Перші досліді по використанню відцентрових машин для розділення насіннєвих сумішей було проведено Ульрихом М.М. (1937р.), яким було запропоновано центрифугальну машину робоча поверхня, якої виконує обертально-коловий та планетарний рух навкруги осі (рис. 1).

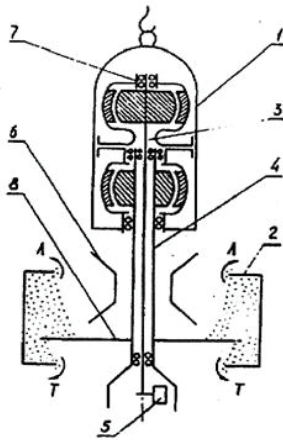


Рис. 4.1. Центрифуга Ульриха М.М.:

1 – рама; 2 – барабан; 3 – вал; 4 – вал пустотілий; 5 – вантаж; 6 – приймач;
7 – підшипник; 8 – диск; Л – легка фракція; Т – важка фракція

Вібропневматичний сепаратор має основні конструктивні елементи: вібропривід, дека, механізми регулювання повздовжнього та поперечного кутів нахилу робочої поверхні (деки), частотний перетворювач для зміни частоти коливань, вентилятор та регулятор повітряного потоку.

Матеріал, що попередньо вирівняний за розмірами подається на робочу безпровальну поверхню деки, яка продувається повітряним потоком та виконує коливальний рух під певним кутом до горизонту. При одночасній дії повітряного потоку і коливань робочої поверхні матеріал переходить у псевдорозріджений стан.

Частинки з більшою густиною занурюються до поверхні деки, а частинки з меншою густиною піднімаються на поверхню шару.

На рис. 4.2 – 4.9 наведено пневмосортувальні столи вітчизняного та закордонного виробництва.

Нижній елементарний шар (важка компонента), що має безпосередній контакт з робочою поверхнею, рухається в напрямку коливань. Верхній шар рухається до похилого краю деки (легка компонента).

В результаті, отримано декілька фракцій, що різняться за густиною частинок фракції, які рухаються за власними похилими, криволінійними траєкторіями до лотків вивантаження.

Швидкість відносного переміщення частинок в шарі насіння залежить від співвідношення густини частинки до густини частинок, що утворюють шар насіння. Також важливий вплив на процес має значення швидкості повітряного потоку на вході до шару насіння.

При однаковій і постійній швидкості повітряного потоку, переміщення елементарних шарів на малій глибині відбувається більш активно.

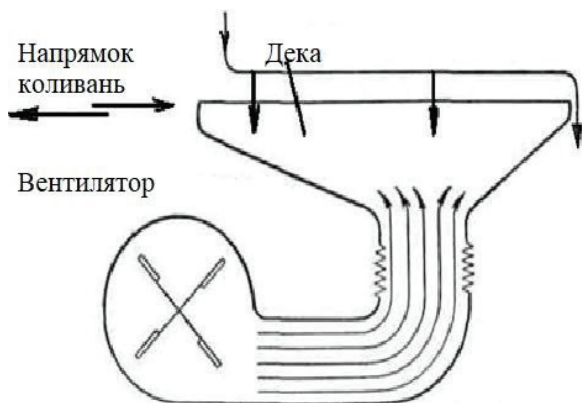


Рис. 4.2. Схема пневмосортувального столу

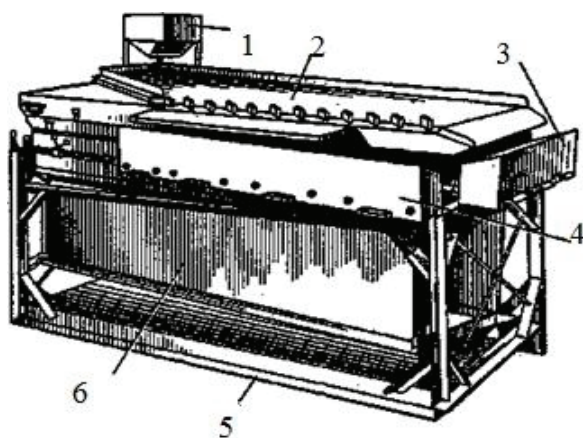


Рис. 4.3. Пневматичний сортувальний стіл ССП – 1,5:

1 – ківш завантажувальний; 2 – дека; 3 – приймач ЛФ; 4 – приймач ВФ;
5 – рама; 6 – камера повітряна

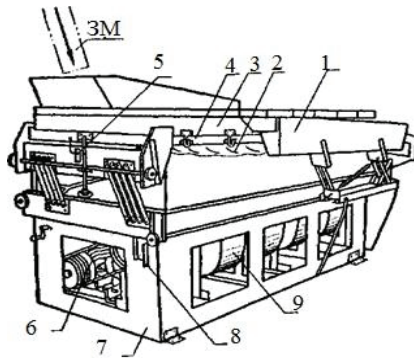
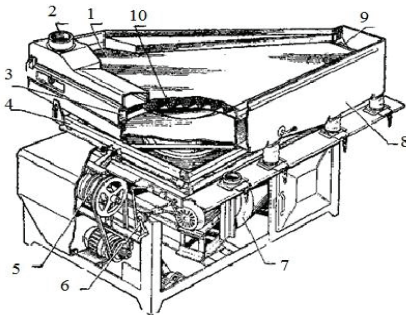


Рис. 4.4. Пневмосортувальний стіл БПС:

1 – лоток транспортувальний; 2 – рукав; 3 – кузов деки; 4 – рама опорна; 5 – шкала повздовжнього нахилу деки; 6 – варіатор приводу; 7 – станина; 8 – шкала поперечного нахилу деки; 9 – вентилятор

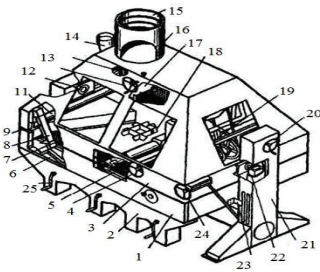


а)

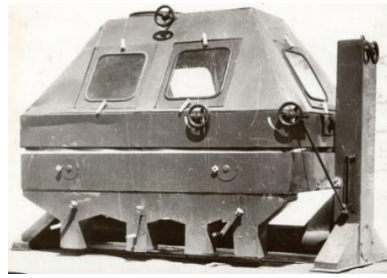


б)

Рис. 4.5. Пневматичний сортувальний стіл ПСС -2,5: а) конструктивна схема; б) загальний вид; 1 – дека; 2 – патрубок завантажувальний; 3 – верхня рамка; 4 – нижня рамка; 5 – механізм регулювання амплітуди коливань деки; 6 – механізм регулювання частоти коливань деки; 7 – вентилятор; 8 – приймач фракцій; 9 – клапан; 10 – решітка підтримуюча



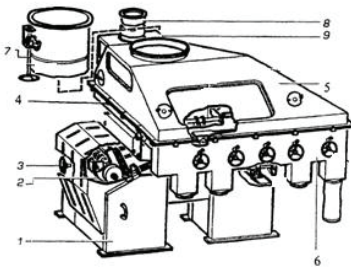
а)



б)

Рис. 4.6. Пневматичний сортувальний стіл СПС – 5:

а) конструктивна схема; б) загальний вид; 1 – корпус деки; 2 – приймач фракцій; 3 – зонт; 4 – регулятор частоти коливань деки; 5 – пружина; 6 – заслінка; 7 – дека; 8 – підвіска; 9 – ущільнювач; 10 – обтягувач; 11 – вісь; 12 – регулятор швидкості повітряного потоку; 13 – світильник; 14 – рукав завантажувальний; 15 – патрубок; 16 – хомут; 17 – бункер; 18 – фільтр; 19 – вібропривід; 20 – регулятор повздовжнього кута нахилу деки; 21 – станина; 22 – вісь; 23 – кронштейн; 24 – регулятор поперечного кута нахилу деки; 25 – рукояті

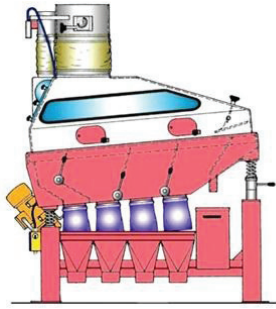


а)



б)

Рис. 4.7. Машина кінцевої очистки МОС – 9С: а) конструктивна схема; б) загальний вид; 1 – станина; 2 – вібропривід; 3 – механізм регулювання частоти коливань деки; 4 – дека; 5 – зонт; 6 – приймач фракцій; 7 – регулятор швидкості повітряного потоку; 8 – рукав завантажувальний; 9 – живильник



а)



б)



в)



г)



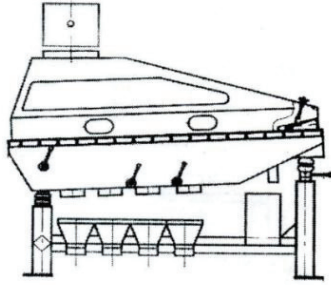
д)



ж)

Рис. 4.8. Вібропневматичні сепаратори закордонного виробництва:

а) «OKRUM» (Італія); б) «PETKUS» KD200 (Німеччина); в) «PETKUS» (Німеччина) KD50; г) «DAMAS» (Швеція); д) «Jubus» (Італія); ж) JGT 1200 JK Machinery



а)



б)



в)



г)

Рис. 4.9. Пневмосортувальні столи вітчизняного виробництва: а) схема і б) загальний вид ППС – 2, 5 (Хорольський механічний завод); в) ПСС «ТОВ Фадеев агро»; г) Клен –ПС-5 «Агро Вектор»

Процес сепарування НМ на робочій поверхні вібропневматичного сепаратора складається з фаз, що проходять одночасно: розшарування НМ на фракції – перша фаза; та транспортування фракцій (важка (ВФ), середня (СФ) і легка фракції (ЛФ)) по робочій поверхні до вивантажувальних пристроїв – друга фаза.

В залежності від необхідного часу протікання процесу сепарації, робоча поверхня трапецієвидної форми, має певні відмінності у конструкції, що наведено на рис. 4.10. Форми робочої поверхні (а), (б) і (в) – забезпечують підвищений час сепарації ВФ; (г) – підвищений час сепарації ЛФ; (д) – рівний час обробки ВФ і ЛФ.

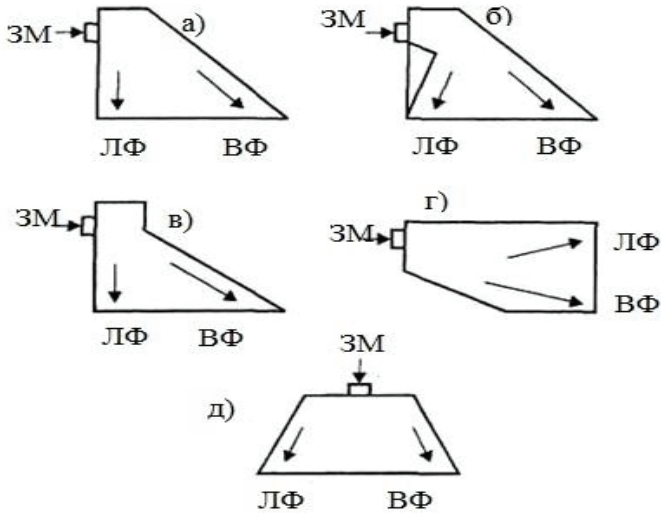


Рис. 4.10. Форми робочих поверхень вібропневматичних сепараторів: НМ – зерновий матеріал; ВФ – важка фракція; ЛФ – легка фракція

Найбільше поширення набули сепаратори з робочими поверхнями типу (а), (б) і (в). Робочі поверхні типу (а) використовуються у пневмосортувальних столах ПСС-1; ПСС-2,5; СПС-5А; МОС-9; Sutton; Buller; Steele & Steele; Forsberg; Kamas.

Робочі поверхні типу (б) представлено у пневмосортувальних столах БПС-3, ССП-5, СП-0,5, Oliver, Heid.

Робочі поверхні типу (в) виробляються фірмою Kamas.

Богатирьовим Д.В. запропоновано інноваційну (рис. 4.11) пневмоімпульсну машину для сепарації насіння за густиною (ПМ) [2].

Для зменшення енерговитрат коливання деки замінено на пульсацію повітряного потоку. Для підвищення якості та стійкості сепарації повітряний канал має пористу перегородку, яка створює вирівняний висхідний потік повітря.

Процес сепарації відбувається таким чином: насіння завантажують в повітряний канал 2 (рис. 4.12) через бункер 6. Товщина шару насіння визначається регулятором 11. Вентилятор 1 нагнітає повітря у повітряний канал 2 через пористу перегородку 4. Пульсатор 5 створює змінний потік повітря, який, проходячи через перегородку 4 пронизує шар насіння. Відбувається сепарація в псевдорозрідженому шарі насіння за густиною, тобто важкі насінини (з найбільшим значенням густини) опускаються на дно перегородки 4, легкі піднімаються вгору, а середні займають місце між важкими та легкими. Далі класифікований за густиною шар насіння рухається до блоку дільників 10. Повітря виходить через сітку 7, яка сполучається з системою вентиляції або з циклоном. Для інтенсифікації процесу сепарації машина має пульсатор 5, що обертається з меншою кутовою швидкістю, ніж вентилятор, і призначений для зміни швидкості фільтрації ω_{ϕ} в межах, які не дозволяють перейти псевдорозрідженому станом в киплячий – при якому неможлива сепарація, бо це є режим пневмотранспорту, тобто створює пульсуючий потік повітря [2].

Вивченню процесів сепарації насінневих матеріалів у псевдорозрідженому шарі присвячено роботи Л. Макса, Б.В. Желтухіна, В.М. Дринчі, С.С. Забродського, П.В. Блохіна, В.А. Годеса, А.І. Берга, І.І. Блехмана, П.М. Заїки та ін [3 – 11].

Математичне моделювання процесу сепарації зводилось до представлення руху частинки по робочій поверхні сепаруючої машини. Встановлено, що процес сепарації складається з двох фаз, які протікають одночасно: сапарація частинок та рух частинок вздовж робочої поверхні до вивантаження.

Ульяновим А.Ф та Бочкарєвим А.І [6] запропоновано математичну модель руху частинки по циліндричній робочій поверхні центрифуги, яка виконує гармонічні коливання

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= m\omega^2 R - P, \\ m\ddot{y} &= -F_{TP} \sin \beta, \\ m\ddot{z} &= mg - F_{TP} \cos \beta - A\omega_1^2 \cos \omega_1 t, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де m – маса частинки;

R – радіус ротора;

ω , ω_1 – частота обертання та коливання ротора;

F_{TP} – сила тертя;

β – кут, що утворено вектором швидкості до вертикалі;

A – амплітуда коливань.

Бариллом А.В. [12] розглянуто рух частинки вздовж твірної параболічного решета без урахування сили Кориоліса. Проаналізувавши рівняння руху було одержано рівняння переміщення частинки в залежності від фазового кута переміщення валу вібробудника

$$\Delta \ell = A \frac{\cos(\beta - \varphi)}{\cos \varphi} \left[\Delta \theta \times \cos \theta + \sin \theta - (\Delta \theta)^2 Z - \sin(\theta + \Delta \theta) \right], \quad (1.2)$$

де $\Delta \ell$ – переміщення;

φ, β – кути тертя та нахилу робочої поверхні до вертикалі;

$\Delta \theta$ – приріст кута повороту валу вібробудника;

Z – функція відцентрової сили та сили тяжіння.

Математична модель руху частинки по поверхні вібровідцентрового сепаратора, яка запропонована Гончаровим Є.С. [7] представлена у вигляді диференційних рівнянь руху частинки «до гори» і «до низу»

$$\begin{aligned} V_b^0 &= \omega_2^2 A \cos \omega_2 t - g(K_y f + 1), \\ V_n^0 &= \omega_2^2 A \cos \omega_2 t - g(K_y f - 1), \end{aligned} \quad (1.3)$$

де: $K_y = \omega_2^2 R / g$ – коефіцієнт відцентровості;

f – коефіцієнт тертя;

ω_2 – кругова частота коливань ротора;

V_b^0, V_n^0 – швидкості відносного руху частинки «до гори» і «до низу»,

відповідно.

Малюта С.І. [13] запропонував аналогічне математичне бачення процесу руху частинки по конічній робочій поверхні під додатковою дією повітряного потоку, яке враховує вплив повітряного потоку K_6 , та визначається співвідношенням:

$$K_6 = (F_1 + F_2) / m \times g, \quad (1.4)$$

де: F_1, F_2 – сили дії на частинку шару статичного та динамічного тиску повітряного потоку.

В роботах авторів наведено спрощене математичне моделювання процесу по робочій поверхні ротора. Частіше за все авторами нехтувався вплив сили Коріоліса, сили гравітаційного поля, впливу опору середовища (повітря) на переміщення частинок матеріалу. Авторами розглядався рух окремої частинки без урахування шару матеріалу. Такого типу припущення суттєво викривляють реальну картину процесу.

При математичному моделюванні процесів руху частинок під дією повітряного потоку на сепаруючих машинах з плоскою робочою поверхнею [14] сила впливу повітряного потоку враховувалась пропорційною квадрату швидкості повітряного потоку на вході в шар:

$$F_g = \lambda \times S_m \rho \times V_g^2 \times 0,5, \quad (1.5)$$

де: λ – коефіцієнт опору;

S_m – площа міделевого перетину;

ρ, V_g – густина та швидкість повітря, відповідно.

При псевдозрідженні матеріалу у пневмоцентрифугах швидкість повітря не перевищує 1,6 м/с, а сили опору набагато нижчі ніж сила тяжіння та відцентрова сила.

Деякі дослідники штучно завищували величину сили опору повітряного потоку. Авторами було використано прискорення повітряного потоку при його чисельному значенні 8 м/с², що відповідає швидкості повітря на вході до шару, яке дорівнює близько – 10 м/с.

Незважаючи на значну кількість робіт з дослідження процесів сепарації, процесам внутрішньозарового переміщення частинок було приділено недостатньо уваги.

Дослідженнями [1] встановлено, що інтенсифікація розділення матеріалу на циліндричних поверхнях центрифуг обмежена, оскільки осьове переміщення шару матеріалу відбувається лише під дією сили тяжіння частинок та при перевищенні кутової швидкості відбувається «зависання» шару і процес сепарації припиняється. Разом з тим, розділення насінневого матеріалу в полі дії відцентрової сили збільшує відсоток травмованого насіння [15].

Системний аналіз технологій отримання насінневого матеріалу з підвищеним біопотенціалом дозволив встановити, що найбільше поширення отримали пневмосортувальні столи з плоскою декою.

Блехман М.І., Гортинський В.В., Желтухін В.Б., Лейкін Я.І. та інші дослідники створили основи теорії сепарування частинок зернових матеріалів у псевдорозрідженому шарі при впливі коливань різного роду.

Пневмо-сортувальний стіл ПСС складається з станини, столу, кузову, камери аспіраційної, каменевідбірника, деки, живильника, клапану регулювального, клапану повітряного, механізму регулювання витрати повітря, патрубків вивантажувальних, ємності для відбору каменів, патрубку завантажувального, механізмів регулювання повздовжнього та поперечного кутів нахилу.

Технологічну схему розділення НМ за фракціями, які різної густини представлено на рис. 4. 13.

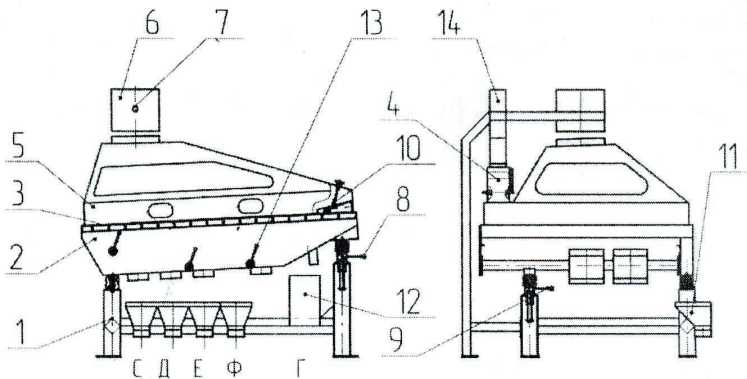


Рис. 4.13. Конструктивна схема пневмо-сортувального столу:

1 – станина; 2 – стіл; 3 – кузов; 4 – камера аспіраційна; 5 – каменевідбірник; 6 – дека; 7 – живильник; 8 – регулювальний клапан; 9 – клапан повітряний; 10 – механізм регулювання витрати повітря; 11 – патрубки вивантажувальні; 12 – ємність для каменів; 13 – патрубок завантажувальний; 14 – механізм регулювання повздовжнього кута нахилу; 15 – механізм регулювання поперечного кута нахилу; С – фракція легка; Д – фракція середня; Е – фракція змішана; Ф – фракція важка; Г – каміння

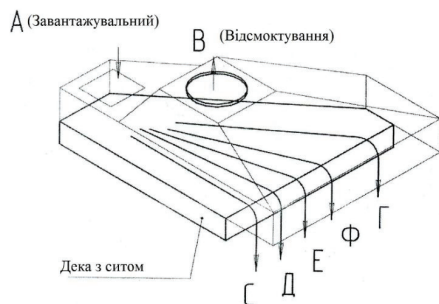


Рис. 4.14 Технологічна схема розділення

Схему підключення пневмо-сортувального столу наведено на рис. 4.15.

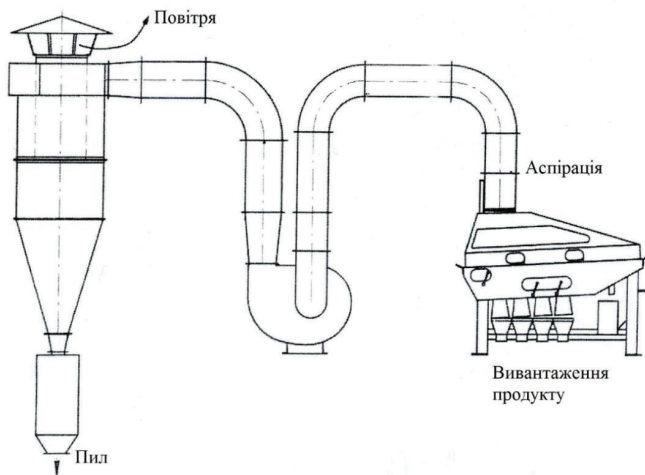


Рис. 4.15. Схема підключення пневмостолу

Насіннєвий матеріал через живильник 7 потрапляє на деку 6 і починає рухатись по поверхні деки у бік патрубків вивантажувальних 11. Під одночасною дією повітряного потоку, що проходить крізь деку 6, і коливань деки матеріал переходить у псевдорозріджений стан. Матеріал розшаровується в шари, які

складаються із частинок, що різняться за власною густиною. Розділення відбувається таким чином, що легка фракція вивантажується у патрубок С, фракція частинок середньої густини у патрубок Д, фракція частинок зі змішаною густиною у патрубок Е, важка фракція у патрубок Ф, а каміння (за наявності) вивантажується у патрубок Г. Час знаходження і швидкість руху НМ на поверхні деки 6 можна змінювати шляхом підбору повздовжнього і поперечного кутів нахилу робочої поверхні.

Основні характеристики пневмостолу: номінальна продуктивність від 2500 до 3500 кг/год (в залежності від культури), частота коливань – 940 кол/хв., амплітуда коливань 5-6 мм, необхідна витрата повітря – не більше 140 м³/хв, кут нахилу деки повздовжній 0-8 град, кут нахилу деки поперечний 0-8 град., встановлена потужність – 0,74 кВт. Габаритні розміри: довжина – 2020 мм, ширина – 1858 мм, висота – 2010 мм.

4.2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ГІДРОДИНАМІКИ БАГАТОФАЗНОЇ СИСТЕМИ, ЯКІ МОДЕЛЮЮТЬ ПСЕВДОРІЗРІДЖЕНИЙ НАСІННЄВИЙ МАТЕРІАЛ

У відповідності до основних концепцій гідродинаміки багатофазних систем (середовищ) [16, 17] будемо вважати, що псевдорозріджений насіннєвий матеріал складається з двох фаз: дискретна фаза, що утворена твердими частинками і неперервна фаза – газоподібне середовище (повітря). Дискретна фаза розглядається, як кінцеве число N дискретних компонент, кожен з яких утворено твердими частинками з густиною $\bar{\rho}_n, n = 1, 2, \dots, N$.

В такому випадку густина безлічі частинок n – компонента дискретної фази дорівнює:

$$\rho_n = \delta_n \bar{\rho}_n, \quad n = 1, 2, \dots, N, \quad (4.1)$$

де: δ_n – об'ємна доля частинок;

n – компонента у псевдорозрідженому насіннєвому матеріалі.

Густину дискретної фази в цілому визначаємо, як:

$$\rho_p = \sum_{n=1}^N \rho_n$$

Густину неперервної фази визначаємо, як:

$$\rho = \bar{\rho} \left(1 - \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{\bar{\rho}_n} \right) = \bar{\rho} \left(1 - \sum_{n=1}^N \delta_n \right), \quad (4.2)$$

де: $\bar{\rho}$ – густина газоподібного середовища (повітря).

Враховуючи (1.1) і (1.2), густина псевдорозрідженого насіннєвого матеріалі в цілому дорівнює:

$$\rho_c = \rho + \rho_p. \quad (4.3)$$

Швидкість руху псевдорозрідженого насіннєвого матеріалі визначаємо з рівняння:

$$\rho_c \vec{V}_c = \sum_{n=1}^N \rho_n \vec{V}_n + \rho \vec{V} \quad (4.4)$$

де: \vec{V}_n – швидкість;

n – компонента дискретної фази;

\vec{V} – швидкість неперервної фази.

Оскільки n – компонента дискретної фази розглядається, як суцільне середовище, то справедливе рівняння безперервності:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla(\rho_n \vec{V}_n) = 0, \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4.5)$$

Аналогічно для неперервної фази:

$$\frac{\partial \rho_n}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.6)$$

Рівняння нерозривності для псевдорозрідженого насіннєвого матеріалі в цілому має вид:

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla(\rho_c \vec{V}_c) = 0 \quad (4.7)$$

Надалі будемо вважати, що суцільні середовища, які моделюють псевдорозріджений насіннєвий матеріал, є Ньютоновськими рідинами. Крім того, шар насіннєвого матеріалу знаходиться на плоскій повітряпроникній поверхні.

Введемо декартову систему координат x_1, x_2, x_3 таким чином, щоб плоска повітряпроникна поверхня лежала у площині x_1, x_2 , в такому випадку вісь x_3 перпендикулярно цій поверхні. Осі x_1 і x_2 нахилено під кутом до горизонтальної площини, відповідно, α_1 і α_2 . Будемо вважати, що повітряпроникна поверхня виконує гармонічні коливання з круговою координатою x_3 . Під дією повітряного потоку і коливань опорної (робочої) повітряпроникної поверхні, шар насіннєвого матеріалу знаходиться у псевдорозрідженому стані. Рівняння руху багатофазної системи, яка моделює рух насіннєвого матеріалу, може бути представлена у вигляді:

$$\rho_n \left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial t} + (\nabla, \vec{V}_n) V_{ni} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[-P_n \delta_{ij} + \mu_n \left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i} \right) \right] + \rho_n F_{ni} + \rho_n \sum_{n=1}^N F_{nm} (V_{mi} - V_{ni}), \quad n=1, 2, \dots, N; \quad i=1, 2, 3. \quad (4.8)$$

де: $V_{ni} - i$ – та компонента швидкості \vec{V}_n n – компонента дискретної фази;

μ_n – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості n – компонента у зерновому матеріалі;

F_{ni} – i – та компонента масової сили, що діє на одиницю маси n – компонента суміші;

P_n – парціальний статичний тиск n – компонента зернового матеріалу;

δ_{ij} – символ Кронекера, за символами, що повторюються передбачається додавання.

Останній член правої частини (4.8) введено для урахування взаємодії n – компонента з іншим m – компонентом насінневого матеріалу. При цьому величини F_{nm} характеризують цю взаємодію і задовольняють умові:

$$\rho_n F_{nm} = \rho_m F_{mn}.$$

Ефективні коефіцієнти в'язкості μ_n , $n = 1, 2, \dots, N$ n – компонента дискретної фази визначаються згідно рівняння:

$$\begin{aligned} \mu_n \left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i} \right) = & \mu \frac{\rho_n}{\rho_c} + \frac{\mu}{\rho_c} \left[(V_{ni} - V_j) \frac{\partial \rho_n}{\partial x_j} + (V_{nj} - V_i) \frac{\partial \rho_n}{\partial x_i} \right] + \\ & + \rho_n (V_{ni} - V_i)(V_{nj} - V_j), \end{aligned} \quad (4.9)$$

де: μ – ефективний коефіцієнт в'язкості матеріалу. Як видно з [17], i – тий компонент сили F_{ni} , яка діє на одиницю маси n – компонента дискретної фази матеріалу, можна навести у вигляді:

$$F_{ni} = \frac{1}{2} \frac{\bar{\rho}}{\rho_n} \left[\frac{\partial}{\partial t} (V_i - V_{ni}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_n) (V_i - V_{ni}) \right] + F_n (V_i - V_{ni}) + \\ + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{V}}{2\sqrt{\pi}a_n\rho_n} \int_0^t \left[\frac{d}{dt} (V_i - V_{ni}) (t - \tau)^{-1/2} \right] d\tau + f_{ni}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (4.10)$$

де: $\bar{\rho}_n$ – густина частинок, що утворюють n – компонент дискретної фази;

$\bar{\rho}$ і V – відповідно густина і коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази;

a_n – еквівалентний радіус (за об'ємом) частинки;

n – компонента дискретної фази;

f_{ni} – i – тий компонент зовнішньої сили, що діє на частинки n – компонента;

F_n – коефіцієнт, який характеризує взаємодію неперервної фази з частинками n – компонента дискретної фази.

Наведені рівняння для компоненти дискретної фази псевдорозрідженого ЗМ характеризують їх, як суцільні середовища, що взаємодіють.

Використаємо рівняння руху неперервної фази насінневого матеріалу.

$$\rho \left[\frac{\partial V_i}{\partial t} + (\nabla, \vec{V}) V_i \right] = - \left(1 - \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{\rho_n} \right) \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] + \\ + \rho F_i - 0,5 \bar{\rho} \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{\rho_n} \left[\frac{\partial}{\partial t} (V_i - V_{ni}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_n) (V_i - V_{ni}) \right] - \\ - \frac{9\sqrt{V}\bar{\rho}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^N \frac{\rho_n}{\rho_n a_n} \int_0^t \left[\frac{d}{dt} (V_i - V_{ni}) (t - \tau)^{-1/2} \right] d\tau - \sum_{n=1}^N \rho_n F_n (V_i - V_{ni}), \quad i = 1, 2, 3. \quad (4.11)$$

Члени правої частини рівняння (4.11) характеризують взаємодію дискретної і неперервної фаз псевдорозрідженого насінневого матеріалу. Так, наприклад, четвертий член враховує прискорення маси частинок дискретної

фази відносно безперервної фази, п'ятий член обумовлено силою Боссе і виражає миттєвий гідродинамічний опір, останній член описує опір частинок дискретної фази.

Рівняння (4.8) – (4.11), які описують зміну кількості руху дискретної і неперервної фази псевдорозрідженого насінневого матеріалу, мають важливе значення, однак, не менш цікаві процеси, які призводять до зміни енергії насінневого матеріалу. Найбільш загальне рівняння, яке описує зміну енергії насінневого матеріалу, одержано у [17]. Для того, щоб навести це рівняння введемо наступні енергетичні характеристики насінневого матеріалу T і T_n абсолютні температури відповідно неперервної фази і n компонента дискретної фази.

Рівняння, яке описує енергетичну зміну насінневого матеріалу набуде вигляду:

$$\begin{aligned}
 & \rho \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V_i^2}{2} + cT \right) + (\nabla, \vec{V}) \left(\frac{V_i^2}{2} + cT \right) \right] + \\
 & + \sum_{n=1}^N \rho_n \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{V_{ni}^2}{2} + c_n T_n \right) + (\nabla, \vec{V}_n) \left(\frac{V_{ni}^2}{2} + c_n T_n \right) \right] = \\
 & = \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \kappa \frac{\partial T}{\partial x_j} + \sum_{n=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} \kappa_n \frac{\partial T_n}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} V_i \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right] + \\
 & + \sum_{n=1}^N \frac{\partial}{\partial x_j} V_{nj} \left[\mu_n \left(\frac{\partial V_{ni}}{\partial x_j} + \frac{\partial V_{nj}}{\partial x_i} \right) \right] + \Phi_E + \sum_{n=1}^N \Phi_{nE}.
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

де: величини Φ_{nE} описують нагрівання частинок за рахунок в'язкої дисипації (розсіювання).

$$\Phi_{nE} = \rho_n F (\vec{V} - \vec{V}_n)^2 + \rho_n \sum_{m=1}^N F_{nm} (\vec{V} - \vec{V}_n)^2, \quad n = 1, 2, \dots, N$$

Величина Φ_E характеризує випромінювання одиниці об'єму насінневого матеріалу і враховує зовнішні джерела тепла.

Таким чином, рівняння (4.5), (4.6), (4.8) – (4.12) описують динаміку і енергетичні характеристики руху зернового матеріалу.

Як видно з (4.8), (4.11) та (4.12), при гідродинамічному моделюванні руху псевдорозрідженого насінневого матеріалу необхідно вводити такі важливі характеристики насінневого матеріалу, як коефіцієнти динамічної в'язкості дискретної і неперервної фаз. Визначення цих величин являє собою достатньо складну задачу [6, 18]. Оскільки її вирішення дозволяє оцінити адекватність математичної моделі реальним фізичним процесам, які супроводжують внутрішньопартикулярний рух частинок насінневого матеріалу. Слід відмітити, що схожу задачу вирішували для моделювання процесів сепарування насінневого матеріалу плоскими і циліндричними решетами [6, 18]. Нижче запропоновано розв'язок цієї задачі для випадку процесів сепарування насінневого матеріалу методом вібраційного псевдорозрідження з постійним за величиною повітряним потоком.

4.2.1. Теоретичний метод визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості псевдорозрідженого насінневого матеріалу

Розв'язок задачі визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості псевдорозрідженого насінневого матеріалу базується на рівнянні (4.8) і припущеннях, які наведено далі.

Будемо вважати, що шар насінневого матеріалу знаходиться в русі під дією вібраційних гармонічних коливань робочої (опорної) повітряпроникної поверхні і потоку повітря. Насінневий матеріал розглядається, як двофазна система, яка складається з неперервної фази, частинки якої знаходяться у псевдорозрідженому стані і дискретної фази, частинки якої відрізняються за аерогравітаційними властивостями і власною густиною від частинок неперервної фази і мають властивість занурюватись і спливати. Концентрація

частинок дискретної фази рахуємо достатньо малою. Тому взаємодія цих частинок і їх впливом на неперервну фазу можна знехтувати. Враховуючи такі припущення, можна навести у вигляді

$$\begin{aligned} \rho_1 \left(\frac{\partial V_{li}}{\partial t} + (\nabla, \vec{V}_2) V_{li} \right) = \frac{\rho_1 \bar{\rho}}{2\rho_1} \left[\frac{\partial}{\partial t} (V_i - V_{li}) + (\nabla, \vec{V} - \vec{V}_1) (V_i - V_{li}) \right] + \\ + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{v}}{2\sqrt{\pi}a_1\rho_1} \int_0^t \left[\frac{d}{d\tau} (V_i - V_{li}) (t - \tau)^{-1/2} \right] d\tau + f_{li}, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (4.13)$$

де: \vec{V} і \vec{V}_1 – швидкості, відповідно неперервної і дискретної фаз;

$\bar{\rho}$ і ρ_1 – густина частинок неперервної і дискретної фаз;

ρ_1 – густина дискретної фази в зерновому матеріалі;

a_1 – еквівалентний радіус (за об'ємом) частинок дискретної фази;

V – ефективний коефіцієнт кінематичної в'язкості неперервної фази (псевдорозрідженого насіннєвого матеріалу);

$f_{li} - i$ – та компонента зовнішньої сили, яка діє на частинки дискретної фази (сила тяжіння в гравітаційному полі). Густини ρ_1 і $\bar{\rho}_1$ зв'язані співвідношенням (4.1), а саме:

$$\rho_1 = \delta_1 \bar{\rho}_1,$$

де: δ_1 – об'ємна доля частинок дискретної фази.

Коефіцієнт F_1 у рівнянні (4.13) характеризує процес переносу кількості руху, що зв'язаний з силою опору неперервної фази. Як наведено у [7], цей коефіцієнт можна представити:

$$F_1 = \frac{\bar{P}}{2\rho_1(1-\delta_1)^2 a_1} \left(1,75V_0 + \frac{75v\delta_1}{a_1} \right), \quad (4.14)$$

де: V_0 – швидкість повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару насінневого матеріалу.

Рівняння (4.13) є нелінійним інтегродиференціальним рівнянням. В загальному вигляді їх розв’язок можна отримати тільки чисельними методами за допомогою ПК [19]. Однак, враховуючи, вище наведені припущення, можна знехтувати у (4.13) нелінійними членами типу $(\nabla, \vec{V}_1)\vec{V}_1$ і $(\nabla, \vec{V} - \vec{V}_1)(\vec{V} - \vec{V}_1)$. Окрім того, оскільки об’ємна концентрація частинок дискретної фази та не особливо впливає на рух неперервної фази, то можна рахувати, що рух неперервної фази відбувається за законом, який задано і визначається вібраційними коливаннями робочої (опорної) поверхні. В результаті рівняння (4.13) стає незалежним. Для розв’язку задачі про визначення ефективного коефіцієнту динамічної в’язкості достатньо обмежитись рівнянням відповідного значення індексу $i=3$, тобто розглядати рух частинок дискретної фази вздовж вісі x_3 , яку направлено перпендикулярно плоскій робочій поверхні. Будемо вважати, що компонента V_3 швидкості неперервної фази змінюється за наступним законом:

$$V_3 = A\omega \cos\alpha_2 \cos\alpha_3 \sin(\omega t), \quad (4.15)$$

де: ω і A – відповідно, кругова частота і амплітуда коливань неперервної фази;

α_3 – кут нахилу напрямку коливань опорної поверхні, який відраховано від осі x_3 ; α_2 – поперечний кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини. Компонента сили тяжіння f_{13} має вид:

$$f_{13} = -\bar{\rho}_1 g \cos\alpha_1 \cos\alpha_2, \quad (4.16)$$

де: α_1 – повздовжній кут нахилу робочої поверхні до горизонтальної площини.

Підставляючи (4.15) і (4.16) у (4.13) та, враховуючи зроблені раніше допущення, після низки перетворень отримаємо:

$$\begin{aligned} & \delta_1(\bar{\rho}_1 + 0.5\bar{\rho})\frac{\partial V}{\partial t} + \rho_1 F_1 V + \frac{9\bar{\rho}\sqrt{V}}{2\sqrt{\pi}a_1\rho_1} \int_0^t \frac{\partial V}{\partial \tau} (t-\tau)^{-1/2} d\tau = \\ & = \rho_1 A \omega^2 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3 \cos\omega t - \bar{\rho}_1 g \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 \end{aligned} \quad (4.17)$$

де: V – відносна швидкість частинок дискретної фази відносно неперервної фази.

Розв'язок інтегродиференційного рівняння (4.17) можна отримати за допомогою перетворення Лапласа за часом. Дійсно, нехай $\bar{V}(q)$ – перетворення Лапласа функції $V(t)$, тобто:

$$\bar{V}(q) = \int_0^{\infty} V(t) e^{-qt} dt \quad (4.18)$$

В такому випадку, використовуючи перетворення Лапласа до лівої та правої частини рівняння (4.17) і враховуючи, що

$$\int_0^{\infty} e^{-qt} \left(\int_0^t \frac{dV}{d\tau} (t-\tau)^{-1/2} d\tau \right) dt = \bar{V}(q) \sqrt{\pi q}$$

отримуємо:

$$\bar{V}(q)(A_1 q + \sqrt{q} A_2 + A_3) = \frac{D_1}{q^2 + \omega^2} + \frac{D_2}{q} \quad (4.19)$$

Тут наведено позначення:

$$A_1 = \delta_1(\bar{\rho}_1 + 0.5\bar{\rho}), \quad A_2 = \frac{q\bar{\rho}\sqrt{V}}{2a_1\rho_1}, \quad A_3 = \rho_1 F_1$$

$$D_1 = \rho_1 A \omega^3 \cos\alpha_2 \cos\alpha_3, \quad D_2 = -\bar{\rho}_1 g \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 \quad (4.20)$$

З (4.19) маємо:

$$\bar{V}(q) = \frac{D_1}{\Phi(q)(q^2 + \omega^2)} + \frac{D_2}{\Phi(q)q}, \quad (4.21)$$

де: $\Phi(q) = qA_1 + \sqrt{q}A_2 + A_3$.

Використовуючи до (4.21) формулу перетворення Лапласа [20], одержимо:

$$V(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{a-i\infty}^{a+i\infty} e^{qt} \bar{V}(q) dq, \quad (4.22)$$

де: $a > 0$ довільне число.

Рівняння (4.22) дає формальний розв'язок (4.17). Для визначення інтегралу у (4.22) використаємо метод віднімання [21]. З цією метою будемо розглядати функцію $\bar{V}(q)$ з (4.21), як функцію комплексного перемінного $q = \text{Re } q + i \text{Im } q$ у комплексній площині, що розрізано за від'ємною напіввіссю $\text{Re } q \leq 0$. Оскільки величина $\Phi(q)$ (4.21) залежить від \sqrt{q} , то для визначеності будемо розглядати ту гілку кореню, для якої $\text{Re } \sqrt{q} \geq 0$. Як легко впевнитись, в цьому випадку функція $\Phi(q)$ не має коренів відносно \sqrt{q} . Тому функція $\bar{V}(q)$ являється аналітичною у комплексній площині з перерізом вздовж піввісі $\text{Re } q \leq 0$ за

виключенням особливих точок $q = \pm i\omega$ типу полюсу [20]. Крім того, ця функція при $|q| \rightarrow \infty$ рівномірно, відносно $\arg q$, добігає до нуля. Ці властивості функції $\bar{V}(q)$ дозволяють деформувати контур інтегрування у (4.22) і використати метод віднімання. В результаті, після ряду перетворень, одержимо:

$$V(t) = \frac{D_1}{\pi} \operatorname{Im} \left(\int_0^{\infty} \frac{e^{-xt}}{\Phi(x)(\omega^2 + x^2)} dx \right) + \frac{D_2}{A_3} + D_1 \operatorname{Re} \left(\frac{e^{i\omega t}}{\Phi(i\omega)i\omega} \right). \quad (4.23)$$

Тут $\operatorname{Re}(\dots)$ і $\operatorname{Im}(\dots)$ позначає, відповідно, реальну і уявну частини комплексного числа. Можна сказати, що при $t \rightarrow \infty$ інтегральний член у (4.22) зменшується за експонентою. Тому для режиму руху частинок насінневого матеріалу, що встановився, цим членом можна знехтувати. В такому випадку:

$$V(t) = \frac{D_2}{A_3} + D_1 \operatorname{Re} \left(\frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)} \right). \quad (4.24)$$

Визначимо другий доданок у (4.24). Маємо:

$$\begin{aligned} \frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)} &= \frac{e^{i\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)}}{\omega\left(i\omega A_1 + \sqrt{i\omega} A_2 + A_3\right)} = \\ &= \frac{e^{i\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right)}}{\omega \sqrt{\left(A_3 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2\right)^2 + \left(\omega A_3 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2\right)^2 + \left(\omega A_1 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2\right)^2}}, \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left(\frac{\omega A_1 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2}{A_3 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2} \right)$$

де

Отримаємо кінцевий результат:

$$\operatorname{Re} \left(\frac{e^{i\omega t}}{i\omega\Phi(i\omega)} \right) = \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\omega \sqrt{\left(A_3 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2 \right)^2 + \left(\omega A_1 + \sqrt{\frac{\omega}{2}} A_2 \right)^2}}. \quad (4.26)$$

Підставивши (4.26) у (4.24) і врахувавши (4.20) маємо вираз для розрахунку відносної швидкості частинок дискретної фази насінневого матеріалу вздовж осі x_3

$$V(t) = -\frac{g \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\delta_1 F_1} + \frac{2\sqrt{2} a_1 \rho_1^2 A \omega^{3/2} \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 \sin(\omega t - \varphi)}{9\bar{\rho} \sqrt{\nu} \sqrt{(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2}}, \quad (4.27)$$

де:

$$B_1 = \frac{2\sqrt{2} \rho_1^2 a_1 F_1}{9\rho \sqrt{\omega \nu}}, \quad B_2 = \frac{2\sqrt{2} a_1 \rho_1 \delta_1 (\bar{\rho}_1 + 0.5\bar{\rho})}{9\rho} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}}. \quad (4.28)$$

Як видно з (4.27) і (4.28), відносна швидкість частинок дискретної фази змінюється гармонічно за часом з частотою коливань робочої поверхні, а її амплітуда складним чином залежить від фізико-механічних параметрів насінневого матеріалу, швидкості повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару, ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості. Для отримання рівняння, яке пов'язує між собою коефіцієнт в'язкості і фізико-механічні характеристики насінневого матеріалу, використаємо принцип еквівалентності імпульсів сил опору руху частинки у різних середовищах [22]. Аналогічний підхід було використано у [18].

Розрахуємо імпульс вили опору руху частинок дискретної фази за один напівперіод коливань неперервної фази. Відповідно до рівняння (4.17), силу опору можна навести у вигляді:

$$F_c = \frac{4\pi a_1^3}{3} \rho_1 F_1 V, \quad (4.29)$$

де: a_1 – еквівалентний радіус частинки дискретної фази;

V – відносна швидкість частинок по відношенню до неперервної фази насінневого матеріалу, коефіцієнт;

F_1 – визначається за формулою (4.14) і має вигляд:

$$F_1 = \frac{\bar{\rho}}{2\rho(1-\delta_1)^2 a_1} \left(1,75V_0 + \frac{75v\delta_1}{a_1} \right). \quad (4.30)$$

тут V_0 – швидкість повітряного потоку на вільній поверхні псевдорозрідженого шару.

Імпульс сили за пів період коливань неперервної фази дорівнює:

$$\begin{aligned} I_c &= \int_{\frac{\varphi}{\omega}}^{\frac{\pi+\varphi}{\omega}} F_c d_t = \frac{4\pi a_1^3}{3} \rho_1 F_1 \int_{\frac{\varphi}{\omega}}^{\frac{\pi+\varphi}{\omega}} V(t) d_t = \\ &= \frac{4\pi a_1^3}{3} \rho_1 F_1 \left[-\frac{\pi g \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\delta_1 F_1 \omega} + \frac{4\sqrt{2}\rho_1^2 A \omega^{1/2} \cos \alpha_2 \cos \alpha_3}{9\bar{\rho}\sqrt{v}\sqrt{(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2}} \right] \end{aligned} \quad (4.31)$$

де величини B_1 і B_2 визначаються за формулою (1.28).

З іншого боку, розглядаючи неперервну фазу ЗМ, як псевдорозріджений шар частинок, можна припуститись, що переміщення частинок дискретної фази, переважно, відбувається у напрямку повітряного потоку по каналам, які

утворюються у псевдорозрідженому шарі. В такому випадку, використовуючи результати одержані у [5], силу опору можна навести наступним чином:

$$F_{c1} = \frac{4\pi a_1^3}{3} \rho_1 (1-\varepsilon)^{1/3} \frac{V^2}{2a_1} \quad (4.32)$$

тут ε – порозність псевдорозрідженого шару насінневого матеріалу;

V – відносна швидкість частинок дискретної фази (1.27). В такому випадку імпульс сили (1.32) за пів період коливань набуває вигляду:

$$I_{c1} = \frac{4\pi a_1^3}{6a_1} \rho_1 (1-\varepsilon)^{1/3} \int_{\frac{\varphi}{\omega}}^{\frac{\pi}{\omega} + \frac{\varphi}{\omega}} V^2 dt =$$

$$= \frac{4\pi^2 a_1^3 \rho_1 (1-\varepsilon)^{1/3}}{6\omega a_1} \left[\frac{g^2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\delta_1^2 F_1^2} - \frac{8\sqrt{2}g \cos \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 \cos \alpha_3 \rho_1^2 A \omega^{3/2}}{9\delta_1 F_1 \bar{\rho} \sqrt{v} \sqrt{(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{8a_1^4 \rho_1^4 A^2 \omega^3 \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_3}{162\bar{\rho}^2 v [(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2]} \right] \quad (4.33)$$

Порівнюючи імпульси I_c і I_{c1} , отримаємо рівняння для визначення ефективного коефіцієнту динамічної в'язкості неперервної фази насінневого матеріалу:

$$-\frac{\pi g \cos \alpha_1 \cos \alpha_2}{\delta_1} + \frac{4\sqrt{2}\bar{\rho}_1^{-2} \delta_1^2 A \omega^{3/2} \cos \alpha_2 \cos \alpha_3 F_1}{9\bar{\rho} \sqrt{v} \sqrt{(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2}} =$$

$$= \frac{\pi}{2} (1-\varepsilon)^{1/3} \left(\frac{g^2 \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2}{\delta_1^2 F_1^2} - \frac{8\sqrt{2}g \cos \alpha_1 \cos^2 \alpha_1 \cos \alpha_3 \rho_1^2 A \omega^{3/2}}{9\delta_1 F_1 \bar{\rho} \sqrt{v} \sqrt{(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2}} + \right.$$

$$\left. + \frac{4\rho_1^{-4} \delta_1^4 A^2 \omega^3 \cos^2 \alpha_2 \cos^2 \alpha_3}{81\bar{\rho}^2 v [(1+B_1)^2 + (1+B_2)^2]} \right) \quad (4.34)$$

Рівняння (4.34) встановлює зв'язок між ефективним коефіцієнтом динамічної в'язкості і наступними параметрами насінневого матеріалу, характеристиками опорної поверхні і швидкістю повітряного потоку:

густина $\bar{\rho}_1$ і $\bar{\rho}$ частинок дискретної і неперервної фаз насінневого матеріалу;

δ_1 і \mathcal{E} – об'ємна концентрація частинок дискретної фази і порозність псевдорозрідженого шару;

α_1 і α_2 – поздовжній і поперечний кути нахилу опорної поверхні по відношенню до горизонтальної площини; амплітуда A і кругова частота ω коливань частинок неперервної фази;

α_3 – кут напряму коливань відносно осі, яка направлена перпендикулярно робочій поверхні.

Таким чином, запропоновано метод, який дозволяє визначити коефіцієнт динамічної в'язкості насінневого матеріалу, який знаходиться під дією повітряного потоку і вібраційних гармонічних коливань робочої поверхні.

4.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ

Теоретичні дослідження потребують експериментального підтвердження адекватності отриманих значень.

За густиною насіння розділяється матеріал, що попередньо очищений від домішок та максимально вирівняний за розмірними характеристиками.

Домішки, які ефективно виділені на попередніх етапах технологічної лінії, відносяться до легковідокремлюваних. Такі домішки виділяються за рахунок різниці у геометричних розмірах частинок та аеродинамічних властивостей.

До важковідокремлюваних домішок слід віднести насіння не основної культури, мінеральні домішки. У таких домішок числові значення розмірних та

аеродинамічних характеристик практично співпадають, або мають не значне відхилення.

Для проведення лабораторних досліджень було використано пневмосортувальний стіл ПСС-2,5.

Якість роботи пневмосортувального столу оцінювалась за питомою продуктивністю та кількістю (поштучно) частинок домішки в очищеному насінні та потраплянню насіння основною фракції до відходу.

Згідно ДСТУ, в кілограмі елітного насіння дозволяється не більше ніж 10 штук зернин іншої культури. Втрати повноцінного насіння не повинні перевищувати 10%.

При оцінюванні ефективності технологічного процесу очищення за чистотою та кількістю домішок, проводять відбір насіннєвого матеріалу масою один кілограм до та після процесу сепарації.

Навіску насіння масою в один кілограм розбирають вручну, виділяючи насіння основної культури та домішок.

На ефективність процесу сепарації істотний вплив має питома навантаження на робочу поверхню деки. При збільшенні питомого навантаження, змінюється рух фракцій шару від оптимальних траєкторій, що істотно погіршує процес розшарування.

Основні характеристики пневмосортувального столу ПСС-2,5: номінальна продуктивність від 2500 до 3500 кг/год (в залежності від культури), частота коливань – 940 кол/хв., амплітуда коливань 5-6 мм, необхідна витрата повітря – не більше $140\text{м}^3/\text{хв.}$, кут нахилу деки повздовжній 0-8 град., кут нахилу деки поперечний 0-8 град., встановлена потужність – 0,74 кВт. Габаритні розміри: довжина – 2020 мм, ширина – 1858 мм, висота – 2010 мм.

При проведенні експериментальних досліджень використовувались ваги типу ВЛКТ-5, похибка яких складає $\pm 200\text{мг.}$

Під час досліджень регулювальною заслінкою, яка знаходиться у живильнику 7, змінювалась подача насіннєвого матеріалу. Незалежно друг від

друга змінювались наступні параметри:

- швидкість повітряного потоку – варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ203 - 5К5-В;

- частота коливань – варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ102-1К5-В;

- амплітуда коливань – варіювалась дебалансними вібраторами ІВ - 104Б-6, які мають шість рекомендованих положень (рис. 4.16);

- повздовжній кут нахилу – змінювався механізмом повздовжнього регулювання;

- поперечний кут нахилу – змінювався механізмом поперечного регулювання.

Швидкість повітряного потоку визначалась термоанемометром DT3880 (діапазон вимірювання 0,1 – 25 м/с) і анемометром з трубкою Піто DT8920 (діапазон вимірювання 1 – 80 м/с). Вимірювання швидкості повітряного потоку проводилось під розподільчою решіткою у різних її частинах (рис. 4.16).

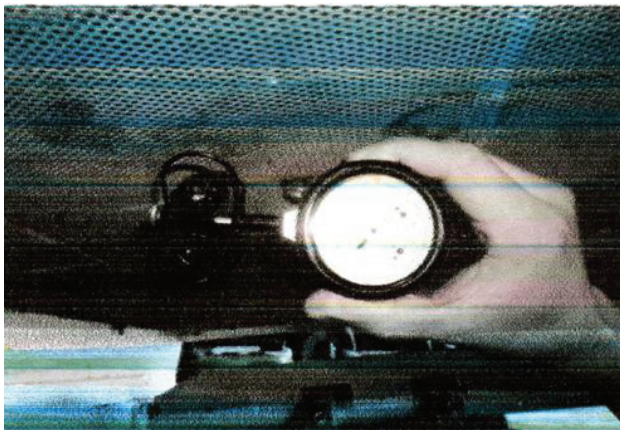


Рис. 4.16. Вимірювання швидкості повітряного потоку крильчатим анемометром

Оскільки організація руху повітряного потоку виконана по схемі «зонт», то деку було розділено на кільцеві зони з центром на осі всмоктування. Поле швидкостей при штатному варіанті опору (перфоровані робочі поверхні на вході і виході повітря з деки) має нерівномірність, яка характерна для такої схеми руху: зменшення швидкості руху повітря по мірі віддалення від всмоктуючого каналу. Слід відмітити, що безпосередньо над всмоктуючим каналом, швидкість повітря близька до рівномірної.

Поле швидкостей при штатному варіанті гідравлічного опору наведено на рис. 4.17.

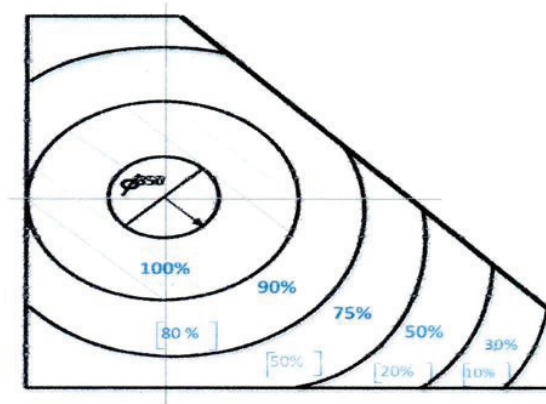


Рис. 4.17. Схема розподілу поверхні деки за зонами різних швидкостей повітряного потоку

Для визначення поля швидкостей при зменшенні гідравлічного опору деки проводилась заміна двох перфорованих поверхонь на одну легкопроникну сітку (встановлено поверхню з ячейкою $0,9 \times 0,9$ мм., при проникності – 65%), що значно вплинуло на поле швидкостей по зонам.

Значення амплітуди коливань вимірювалось стробоскопічним балансувальним індикатором СБ-6, який призначено для балансування та

вібродіагностики обладнання. Для вимірювання амплітуди коливань ПСС у повздовжньому напрямку щуп вібродатчика встановлювався до торцевої частини пневмостолу. Коливання, які збуджує вібратор, сприймає датчик стробоскопічним балансувальним індикатором СБ-6. Електричний сигнал, що виникає в процесі вимірювання, потрапляє до приладу, де він обробляється і виводиться на стрілочний індикатор, по відхиленню якого визначається амплітуда коливань ПСС.

Механізм регулювання кутів нахилу представлено на рис. 4.18.

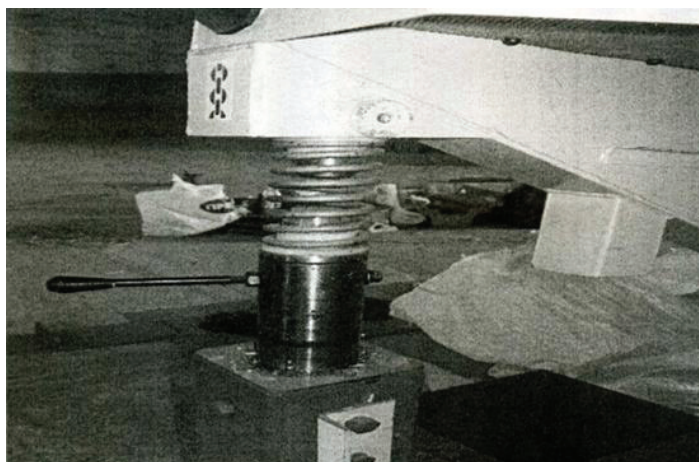


Рис. 4.18. Механізм регулювання кутів нахилу пневмосортувального столу

Дослідження роботи ПСС проводились у відповідності до: ОСТ 70.10.2 – 83 «Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини і агрегати, зерноочисно-сушильні комплекси. Програма і методика випробувань»; РТМ 8.53.00 – 64 – 84 «Сепаратори зерноочисні. Програма і методика випробувань»; СОУ 74.3 – 37 – 147:2004 «Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисно – сушильні комплекси».

4.4. ВІБРОПНЕВМОВІДЦЕНТРОВІ СЕПАРАТОРИ

Процес розділення насіннєвого матеріалу за густиною насіння циліндричними вібропневмовідцентровими сепараторами має суттєві відмінності від процесу розділення на пневмо-сортувальному столі.

Дослідження процесу вібропневмовідцентрового розділення насіннєвого матеріалу проводились на лабораторному циліндричному вібропневмовідцентровому сепараторі (рис. 4.19) [1], який побудовано на елементній базі сепаратору типу БЦС, що серійно випускається.

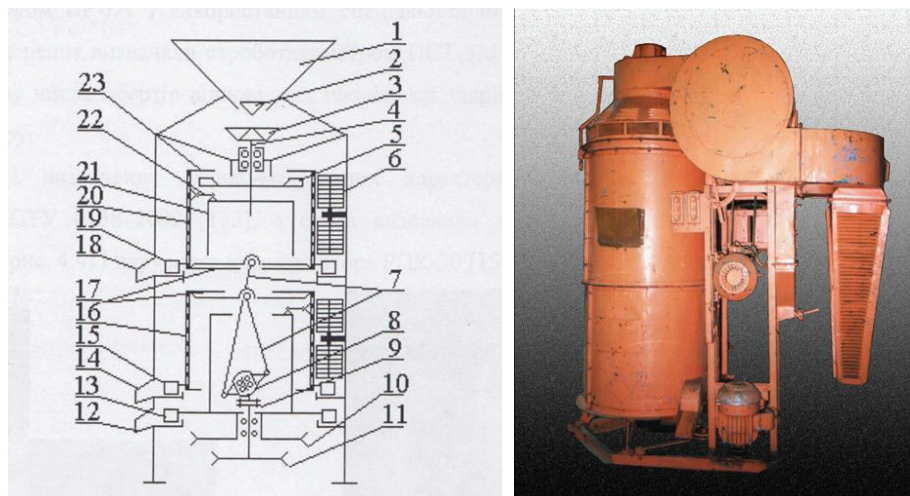


Рис. 4.19. Конструктивна схема (а) і загальний вид (б) лабораторного циліндричного вібропневмовідцентрового сепаратора

Насіннєвий матеріал через завантажувальний пристрій 1 з регулятором 2 потрапляє на розкидач 4, який розташований на роторі 5, що споряджено модернізованою повітряпроникною робочою поверхнею. Ротор складається з

двох секцій, які в процесі робочого циклу рухаються у взаємопротилежні боки насінневого матеріалу, завдячуючи відцентровій силі, притискається до робочої поверхні, а під дією сили ваги и коливань ротора починає рухатись до низу у зону вивантаження, до вивантажувальних лотків 9. Повітряний потік, який створює вентилятор 12, всмоктується через повітряні жалюзі, проходить через робочу поверхню і шар насінневого матеріалу, розпушуючи його. Таким чином шар насінневого матеріалу переходить у псевдорозріджений стан.

Робочі поверхні, на відміну від сепараторів типу БЦС – безпровальні. Нижня секція сепаратора має розділювач, який розташовано у нижній частині секції.

За рахунок дії сил: тяжіння, відцентрової і повітряного потоку, насінневого матеріалу сепарується на шари, які складаються з частинок різної густини і виводяться, в залежності від фракції (важка, середня, легка) у свої вивантажувальні лотки.

Основні характеристики лабораторного циліндричного вібропневмовідцентрового сепаратора: продуктивність – від 4000 до 6000 кг/год., частота коливань – 90 с^{-1} , амплітуда коливань – 6 мм, необхідна витрата повітря 130 -140 $\text{м}^3/\text{хв.}$, встановлена потужність – 7,2 кВт, тиск вентилятора – 500 Па. Висота робочої поверхні – 500 мм.

Під час досліджень, змінюючи величину отвору, заслінкою 2 регулятора завантаження, регулювалась подача насінневого матеріалу.

Незалежно друг від друга змінювались наступні параметри:

- швидкість повітряного потоку – варіювалась частотним перетворювачем ПЧВ203 - 5К5-В;
- частота коливань – варіювалась за допомогою варіатора приводу і частотним перетворювачем ПЧВ102- 1К5-В;
- амплітуда коливань – зміною місць поєднання шатунів з траверсами;
- питома навантаження – регулюванням регулятора завантажувального пристрою.

Швидкість повітряного потоку визначалась термоанемометром DT3880 (діапазон вимірювання 0,1 – 25 м/с) і анемометром з трубкою Піто DT8920 (діапазон вимірювання 1 – 80 м/с).

При завантажуванні лотків і дозаторів використовувались ваги типу ВЛКТ-5, похибка яких складає ± 200 мг.

Значення амплітуди коливань визначалось вібрографом ВР-1 за допомогою спеціальних штанг. Отримані значення виводились приладом на стрічку, шляхом дряпання шару стрічки.

Частота коливань і обертання ротора з робочою безпровальною поверхнею визначалось строботометром ТСт100 і цифровим безконтактним тахометром АКІП-9201 з можливістю вимірювання швидкості обертання від 0 до 100000 об/хв, шляхом вимірювання числа обертів привідних шківів.

При визначенні фізико – механічних властивостей, насінневого матеріалу попередньо був очищений аерогравітаційним сепаратором та трієрним блоком «Петкус». Розмірні характеристики частинок насінневого матеріалу визначались у відповідності до ДСТУ 4138-2002 решітним класифікатором РКФ-1. Розміри частинок насінневого матеріалу визначено за допомогою лінійки з клиновою щілиною.

Для покращення гостроти розділення насінневого матеріалу на робочій поверхні встановлювались додаткові хвилеподібні інтенсифікатори процесу розшарування. Оскільки час знаходження насінневого матеріалу на робочій поверхні не завжди достатній для максимального розшарування насінневого матеріалу за густиною і значний відсоток повноцінного зерна з високою власною густиною потрапляє до лотків, що призначені для фракції з меншою власною густиною доцільно використання додаткових механічних інтенсифікаторів розшарування.

Звдячуючи формі інтенсифікаторів (рис. 4.20, 4.21), насінневого матеріалу штучно пришвидшує і уповільнює свій рух, що додатково інтенсифікує рух частинки зернового шару. У нижній частині хвилеподібного

інтенсифікатора передбачено щілину, яка призначена для можливого переміщення нижнього елементарного шару насінневого матеріалу, до якого потрапляють частинки з більшою власною густиною у бік вивантажувального патрубку для частинок з більшою густиною (важка фракція).



Рис. 4.20. Загальний вид ПСС під час виробничих досліджень

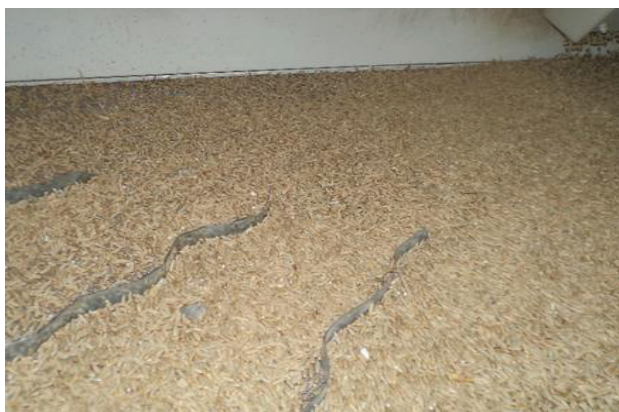


Рис. 4.21. Хвилеподібні інтенсифікатори процесу

4.5. МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ЧАСТКИ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ У ВІБРОПНЕВМОРОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВОЇ СИЛИ

Розглянуто рух центру мас зернівки [7, 23], яка відрізняється від зернівок шару, які утворюють шар насіннєвого матеріалу. Шар насіннєвого матеріалу складається з безлічі частинок, які однакові за розмірами та різняться за густиною, координати якої збігаються з координатами x, y, z , а її маса m дорівнює масі однієї частинки [24, 25]. Сипке середовище перебуває на внутрішній стороні вертикальної шорсткої циліндричної поверхні ротора радіуса R , що обертається навколо вертикальної осі з кутовою швидкістю ω і здійснюючої одночасно вертикальні коливання з амплітудою A й круговою частотою ω_1 .

Відповідно до другого закону Ньютона

$$m\bar{a} = \sum_i \bar{F}_i, \quad (4.35)$$

де: a – абсолютне прискорення частки;

\bar{a}_0, \bar{a}_n – прискорення частинки у відносному й переносному рухах відповідно;

$\sum \bar{F}_i$ – сума сил, що діють на частинку.

Відповідно прийнятої системи координат $O^{x,y,z}$ рівняння відносного рухові частинки набуде вигляду:

$$\begin{aligned} mx'' &= \sum_{i=1}^n F_{xi} - mx_n'', \\ my'' &= \sum_{i=1}^n F_{yi} - my_n'', \\ mz'' &= \sum_{i=1}^n F_{zi} - mz_n'', \end{aligned} \quad (4.36)$$

де: $\sum F_x, \sum F_y, \sum F_z$ – проекції на координатні осі сил, що діють на частинку.

Задачу розглянуто з урахуванням гравітаційного поля відцентрових сил, що характеризуються прискореннями вільного падіння g і відцентрового прискорення $j_u = R_{cp} \omega^2$. На частинку діють наступні сили (рис. 4.22).

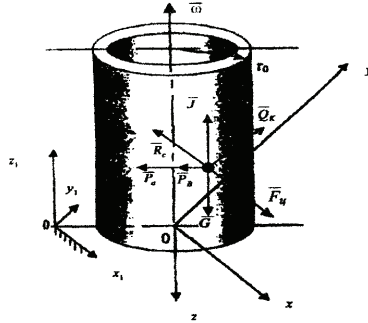


Рис. 4.22. Схема сил, що діють на зернівку у вібропневморозрідженому шарі насіння

Сила ваги:

$$G = mg \tag{4.37}$$

Як встановлено попередніми дослідженнями [8, 25 – 27], шар сипкого матеріалу при впливі на нього вібрацій набуває властивості рідини, крім того, його можна розглядати як сукупність твердих частинок. Тому, при моделюванні сипкого середовища нестисливої рідини, необхідно в число діючих на частинку сил, включити силу, що виштовхує, рівну, у першому наближенні, силі Архімеда:

$$P_a = -m_0 g = -V \rho_c g, \tag{4.38}$$

де: ρ_c – густина «середовища»;

m_0 – маса "середовища" в об'ємі частки,

і силу, подібну до Архімедової:

$$P'_a = m_0 a_n, \quad (4.39)$$

а також силу інерції приєднаних мас [28]

$$F_{np} = -m' a_n,$$

де: m' – маса, що приєднує до частинки при її русі.

Для визначення величини й напрямку сили Кориоліса зручно використати векторне рівняння

$$\bar{Q}_k = 2m(\bar{\omega} \times \bar{V}_v), \quad \dots\dots (4.40)$$

де: \bar{V}_v – відносна швидкість частки при її переміщенні в обертовому шарі насіння;

$\bar{\omega}$ – вектор кутової швидкості переносного руху.

Сила впливу повітряного потоку, може бути представлена сумою сил динамічного й статичного тиску

$$P_s = P_d + P_c. \quad (4.41)$$

Сила динамічного впливу потоку на частку визначається формулою Ньютона

$$P_d = k_c \frac{\gamma_s}{g} S_M (V_s - V_v)^2 = mK_{II} (V_s - V_v)^2, \quad (4.42)$$

де: k_c – аеродинамічний коефіцієнт опору;

γ_s – питома вага повітря;

K_{II} – коефіцієнт парусності.

Сила статичного впливу потоку, спрямованого нормально до повітропроникної циліндричної поверхні ротора, визначається різницею тиску повітря в шарі

$$P_c = S_M \cdot \Delta P, \quad (4.43)$$

де: ΔP – аеродинамічний опір шару.

При впливі повітряного потоку на шар сипкого матеріалу, що перебуває в полі відцентрової сили, перепад тисків визначається відповідно

$$\Delta P_{ц} = a_n \rho_{э} \int_0^{H_{cl}} (1 - \varepsilon) dh_{cl}, \quad (4.44)$$

де: $\rho_{э} = \rho_{ч} - \rho_c$ – еквівалентна щільність шару;

ε – порозність зернистого шару;

H_{cl} – товщина шару;

h_{cl} – координата по товщині шару.

Опір повітряного потоку через коефіцієнт парусності K_{II} , одержимо:

$$P_6 = mgK_{II}. \quad (4.45)$$

Для визначення останнього за аналогією можна записати вираз:

$$K_{II} = \left(\frac{V_6}{V_{кр}} \right)^2 + \frac{4 r_0 \omega^2 (1 - \varepsilon) (\rho_{ч} - \rho_c)}{3 d_{э} \psi g \gamma_{ч}} H_{cl}, \quad (4.46)$$

де: r_0 – відстань від осі обертання до частки;

$d_{э}, \psi$ – еквівалентний діаметр частки й коефіцієнт форми відповідно;

$V_{кр}$ – критична швидкість повітряного потоку;

$\gamma_{ч}$ – питома вага "матеріалу" частки.

Сила опору середовища в загальному випадку враховує як опір внутрішнього тертя, так і характер взаємодії часток у шарі сипкого матеріалу. Опір руху частки усередині шару, з огляду на вібраційний характер взаємодії часток, мабуть, буде залежати і від кінематичних параметрів робочої поверхні. З огляду на двоїсту природу сипкого середовища [24, 25, 27, 29] при вібропневморозрідженні, силу опору в першому наближенні можна вважати подібній до сили сухого тертя

$$R_c = -R^*(j_{e.o.}), \quad (4.47)$$

$$R^* = -R_{e.o.}(j_{e.o.}),$$

де: $j_{e.o.}$ – вібраційне прискорення;

$R_{e.o.}$ – опір середовища по осях координат.

Для визначення проекцій сили опору R_c на осі координат (у системі відліку $Oxyz$) будемо вважати, що вона спрямована убік протилежний напрямку вектора швидкості частки у відносному русі \vec{V} . Тоді проекції сили опору рухові частки усередині шару можна записати так

$$\begin{aligned} R_x &= -R_c \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ R_y &= -R_c \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ R_z &= -R_c \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \end{aligned} \quad (4.48)$$

Визначимо переносний рух частки $a_{\Pi} = a_{\Pi}(t)$. Воно визначається коливаннями шару у вертикальному напрямку уздовж осі z за гармонійним законом

$$z = A \sin \omega_1 t.$$

Сила інерції від переносного русу в проекції на вісь z виражається співвідношенням:

$$J_z = mA\omega_1^2 \sin \omega_1 t = m z_{\Pi}'' . \quad (4.49)$$

Проекції сили інерції J від обертового рухові частки на осі x й y відповідно визначається:

$$J_x = m\omega^2 x . \quad (4.50)$$

$$J_y = m\omega^2 y . \quad (4.51)$$

Підставивши проекції всіх розглянутих над силу на осі системи координат $Oxyz$, одержиме рівняння руху частки відносно шару сипкого матеріалу, що перебуває на внутрішній поверхні ротора вібропневмоцентрифуги:

$$\begin{aligned} mx'' &= (m - m_0)\omega^2 x - P_g \cos \alpha + 2m\omega \dot{x} - R_C \frac{\dot{x}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ my'' &= (m - m_0)\omega^2 y - 2m\omega \dot{y} - R_C \frac{\dot{y}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \\ mz'' &= (m - m_0)g - P_g \sin \alpha \pm A\omega_1^2 \sin \omega_1 t - R_C \frac{\dot{z}}{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2}}, \end{aligned} \quad (4.52)$$

Отримана система нелінійних диференціальних рівнянь [7] описує відносний рух частки усередині шару сипкого матеріалу, що обертається навколо вертикальної осі, яка робить вертикальні гармонійні коливання.

Система є універсальною математичною моделлю й описує рух частки усередині вертикального ротора віброцентрифуги.

При $x=R$; $y=0$ й $m_0=0$ (відсутність сили, що виштовхує, шар, тобто відсутність шару на поверхні) рівняння описують рух матеріальної точки по ротаційній поверхні обертання, вісь якої спрямована вертикально. При цьому сила опору R_c буде дорівнює силі тертя $F_{TP} = fN$, де N – нормальна реакція поверхні обертання.

Система суттєво нелінійна, тому рішення будемо шукати чисельними методами при початкових і граничних умовах

$$\begin{aligned} t = 0, x = x_0, y = 0, z = 0; \\ \frac{dx}{dt} = V_{x0}, \frac{dy}{dt} = V_{y0}, \frac{dz}{dt} = V_{z0}. \end{aligned} \quad (4.53)$$

У роботах [15, 30] показано, що рух частинок у роторі осаджувальних машин визначається не тільки конструктивними й кінематичними параметрами, а і у значній мірі залежить від початкових умов їхнього руху.

Початкові умови руху частки характеризуються швидкістю входу частки в шар в радіальному й вертикальному напрямках: V_{x0}, V_{y0}, V_{z0} .

Для визначення початкових розумів руху часток розглянемо процеси рухові частинки від завантаження до шару.

Матеріал подається спочатку на обертову поверхню диска, рухається по ній, а потім відкидається убік циліндричної поверхні, переборюючи при вільному польоті опір повітряного потоку (повітряного середовища).

На частинку, що переміщається по диску, діють сили: сила ваги $G = mg$; відцентрова сила $F_u = m\omega_2^2 x$, де x - відстань від зони надходження зерна;

кориолісова сила $2m\omega_2\dot{x}$; сила тертя частинки по поверхні диска $F_{mp1} = f_{mp}mg$,

сила тертя частинки по поверхні лопатки $F_{mp2} = 2f_{mp}m\omega_2\dot{x}$.

Рівняння руху частинки по поверхні дискового носія

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + 2f_{mp}m\omega_2 \frac{dx}{dt} - m\omega_2^2x = -mf_{mp}g, \quad (4.54)$$

де: ω_2 — кутова швидкість диска, рівна швидкості обертання ротора;

f_{mp} — коефіцієнт тертя частки по поверхні.

При початкових умовах: $t=0$; $x=x_0=r_0$; $\frac{dx}{dt} = 0$, одержимо:

$$x = \frac{1}{k_2 - k_1} \left[r_0 + \frac{f_{mp}g}{\omega_2^2} \right] (k_2 e^{k_1 t} - k_1 e^{k_2 t}) - \frac{f_{mp}g}{\omega_2^2}, \quad (4.55)$$

де: k_1, k_2 — корінь характеристичного рівняння.

$$k_1 = \omega \left(\sqrt{1 + f_{mp}^2} - f_{mp} \right),$$

$$k_2 = \omega \left(-\sqrt{1 + f_{mp}^2} - f_{mp} \right).$$

Швидкість руху частинки по диску уздовж лопатки визначимо диференціюванням рівняння

$$V_x = \dot{x} = \frac{f_{mp}}{\omega^2} g \left[\frac{k_1 - k_2}{k_2 - k_1} (e^{k_1 t} - e^{k_2 t}) \right]. \quad (4.56)$$

Переносна швидкість спрямована по дотичній і дорівнює

$$V_n = \frac{L\omega}{\cos \delta}, \quad (4.57)$$

$\delta = \arctg \frac{r_o}{L}$; r_o – відстань лопатки від центра обертання;
 L – довжина лопатки.

При радіально встановленій лопатці, згідно [31], середня абсолютна швидкість зльоту часток на 17...20 % більше окружної швидкості диска, тобто

$$V_c = (1,17 \div 1,2)V_n, \quad (4.58)$$

З огляду на те, що у традиційних вібровідцентрових машинах для зменшення розсіву зерна і його рівномірної подачі на ротор на внутрішній поверхні останнього встановлені радіальними напрямні, переміщеннями частки в тангенціальному напрямку можна знехтувати.

Надалі для зручності розрахунків горизонтальна швидкість руху частинки в пристрої, що використовується для подачі, апроксимировано залежністю

$$V_c = a_0 \left(\frac{g}{\omega^2 r} \right)^{a_1} f^{a_2}, \quad (4.59)$$

де: a_0, a_1, a_2 – константи, що залежать від форми частинок.

У момент сходу частки з диска на неї діє сила опору повітряного середовища, прийнята згідно [24, 25, 32, 33] пропорційної квадрату швидкості відносного руху.

$$R_g = K_{II} V_c^2 = K_{II} (V_c - V_g)^2,$$

де: V_c – швидкість частки.

На підставі принципу Даламбера складемо рівняння вільного руху частки в повітряному середовищі

$$m \frac{dV_x}{dt} = -R_x, \quad (4.60)$$

$$-m \frac{dV_z}{dt} = mg - R_z, \quad (4.61)$$

де: V_x , V_z – відповідно горизонтальна й вертикальна складова швидкості руху частки;

R_x , R_z – опір з боку повітря руху частинки в горизонтальному і вертикальному напрямку (осі $0z$, $0x$).

Розглянемо горизонтальний рух частинок. При швидкості руху зернівки, величина якої відповідає значенню критерію Рейнольдса $R_e \leq 2000$, опір повітряного середовища можна визначити на основі співвідношення

$$R_x = C_x(R_e) \rho S_M \frac{V_x^2}{2}, \quad (4.62)$$

де: $C_x(R_e)$ – коефіцієнт опору як функція критерію Рейнольдса.

У діапазоні зміни швидкостей $5 \text{ м/с} < V < 20 \text{ м/с}$ значення коефіцієнта опору визначиться співвідношенням у вигляді

$$C_x R_e^2 = a_1 R_e^2 + \epsilon_1 R_e, \quad (4.63)$$

де: $a_1 = 0.17$; $\epsilon_1 = 22,6$,

Одержимо для сили опору в горизонтальному напрямку

$$R_x = \frac{\rho S_M}{2} a_1 V_x^2 + \frac{\rho S_M}{2} \epsilon_1 \frac{v}{d_s} V, \quad (4.64)$$

Рівняння приведемо до виду

$$V_x \frac{dV_x}{dx} = -R_x, \quad (4.65)$$

і з огляду на одержиме після перетворень

$$\frac{dV_x}{dx} = -A_1 V_x - B_1, \quad (4.66)$$

де: $A_1 = \frac{1}{2} a_1 \rho_e d_s^2 \frac{1}{m},$

d_s – еквівалентний діаметр зернівки;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря.

Рішення рівняння при початкових умовах: $x=0, V_{0x}=0$ дозволяє одержати значення швидкості переміщення зернівки всередині ротора (при відсутності руху середовища) у горизонтальній площині

$$V_x = \left(\frac{B_1}{A_1} - V_0 \right) e^{-A_1 x} - \frac{B_1}{A_1}, \quad (4.67)$$

Вертикальна складова швидкості руху частинки в силу того, що вона визначається лише складовою гравітаційних сил, значно менше горизонтальної складової. По проведеній оцінці коефіцієнт опору для вертикальної складової швидкості зернівки може бути визначений з умов аналогічних вільному падінню (частки) з використанням співвідношень [34]

$$R_c^2 = \frac{4}{3} \frac{A_r}{C_z}; \quad C_z = \frac{4}{3} \frac{g d_s (\rho_T - \rho_B)}{\rho_B V^2}. \quad (4.68)$$

Тоді величину опору, з урахуванням значень складових, визначимо формулою:

$$R_z = \frac{2}{3} g d_3^2 (\rho_3 - \rho_6), \quad (4.69)$$

і рівняння прийме вид

$$\frac{dV_z}{dz} = g \left[1 - \frac{2}{3} \frac{d_3^3}{m} (\rho_3 - \rho_6) \right]. \quad (4.70)$$

При нульових початкових умовах ($z=0, V'_z=0$) рішення буде

$$V_z = \sqrt{2g \left(1 - \frac{4}{\pi} \frac{\rho_3 - \rho_6}{\rho_3} \right) z_0}. \quad (4.71)$$

Відстань від осі диска до вільної поверхні шару дорівнює

$$x_0 = R_1 - \delta_{cl}, \quad (4.72)$$

де: R_1 – радіус диска;

δ_{cl} – товщина шару на диску.

Товщина шару залежить від швидкості його переміщення, питомої подачі зерна на ротор вібропневмоцентрифуги і може бути визначена очевидним співвідношенням:

$$\delta_{cl} = \frac{Q}{2\pi R_1 \rho_n V_{cp}}, \quad (4.73)$$

де: Q – продуктивність сепаратора;

V_{cp} – середня швидкість поступального переміщення шару;

ρ_n – насипна густина насінної суміші.

Таким чином, початкові умови для рішення системи диференціальних рівнянь можуть бути задані відповідними співвідношеннями.

Рішення завдання переміщення частки у вібровідцентровому шарі сипкого матеріалу при різних значеннях величини сил опору дозволило визначити кінематику горизонтального й вертикального занурення в шар і визначити характер зміни величин швидкостей і траєкторії переміщення частки.

Характер зміни швидкості, переміщень частки у відцентровому шарі сипкого матеріалу, підданого вертикальним вібраціям, ілюструються графіками $V_x(t), V_y(t), V_z(t)$ й $V(t), x(t), z(t), y(t)$.

Характер зміни зазначених величин, як показав аналіз, значно відрізняється від прогнозованого.

Гіпотеза про пропорційність сили опору середовища вібророзрідженого шару першій похідній від переміщення частки (убік заглиблення) прийнята при проведенні чисельного експерименту, привела до задовільної збіжності якісних картин занурення частинки, отриманих розрахунковим і дослідним шляхом.

$$R_c = K_x \dot{x} = K_y \dot{y};$$

$$R_c = K_z \dot{z},$$

При цьому система рівнянь було перетворено до виду:

$$m\ddot{x} = (m - m_0)\omega^2 x - K_{r_0} \dot{x} + 2m\omega \dot{x} - P_0 \cos \alpha,$$

$$m\ddot{y} = (m - m_0)\omega^2 y - K_{r_0} \dot{y} - 2m\omega \dot{y},$$

$$m\ddot{z} = (m - m_0)g - K_{r_0} \dot{z} - A\omega_1^2 \sin \omega_1 t - P_0 \sin \alpha. \quad (4.74)$$

Аналіз результатів чисельної апробації моделі, за умови ($K_T = \text{const}$, $K_e = \text{const}$) сталості коефіцієнтів при похідній від кореляцій показав, що прийнята математична модель досить точно описує процеси переміщення частки в шарі при $P_e = 0$. При цьому виявлені незначні переміщення частки по осі Oy у порівнянні з Ox , що характеризує слабкий вплив сили Коріоліса і можливість виключення її з розрахунків без істотного зниження точності опису процесів.

Разом з тим, аналізом проведеного моделювання з використанням моделі встановлено, що при збільшенні значень сили опору повітряного потоку P_v , а так само при довільній зміні величини коефіцієнтів опору K_T , K_e , характер протікання процесів занурення частки якісно змінюється. Цей факт може бути пояснений тільки тим, що при довільній зміні коефіцієнтів опору середовища й повітря не враховується зміна параметрів сипкого середовища, обумовлених у залежностях $K_e(\omega, V_e)$, $K_T(\omega, V_e)$, $K_{en}(\omega, V_e)$ й $m_0(\omega_1, A, V_e)$, а також їхнього взаємного впливу [7, 24].

Висновки до розділу 4

Для отримання високоякісного насінневого матеріалу з підвищеним біологічним потенціалом, після очищення матеріалу та розділення його на фракції за розмірними характеристиками, доцільно використання сепаруючих машин, які поділяють матеріал за густиною насіння.

Розділення матеріалу за густиною насіння дозволяє виділити найбільш активне насіння з підвищеним біологічним потенціалом та, під час обробки, суттєво знизити ступінь травмованості насіння. Використання насінневого матеріалу, одержаного шляхом фракціонування за густиною насіння, дозволяє покращити польову схожість зерна і, відповідно, підвищити урожайність культури.

Не зважаючи на складність налаштувань, для реалізації поставленої задачі ефективно використовувати пневмосортувальні столи, або

вібропневмовідцентрові сепаратори, які доцільно використовувати, як окремі машини для сепарації малих партій насінневого матеріалу, так і у поточних технологічних лініях отримання насінневого матеріалу великої продуктивності до 5 т/г.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Бредихін В.В. Механіко–математична модель руху зернових сумішей у віброцентрифугах: Механізація та електрифікація сільського господарства. Глевах. Вип.85, 2001р. С.116-119.

2. Богатирьов Д.В. Обґрунтування параметрів пневмоімпульсної машини для сепарації насіння за густиною: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Кіровоград, 2005. 152 с.

3. Авдеев А.В., Машковский М.Ф., Полуэктов В.Н. Повышение эффективности зерноочистительных комплексов и линий: Механизация и электрификация сельского хозяйства. 1988. №9. С.53–54.

4. Авдеев Н.Е. Интенсификация процесса сепарирования зерновых материалов в сложном силовом поле: Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1987. №3. С.27–31.

5. Барский М.Д., Пласкин И.П. Критерии оптимизации разделительных процессов. М.: Наука, 1987. 119с.

6. Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. М.:Наука,1964. 440с.

7. Бредихін В.В. Обґрунтування параметрів процесу вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.05.11. Харків, 2003. 203 с.

8. Бредихин В.В. Изыскание способов повышения эффективности виброцентробежного разделения зерновых смесей: Праці Таврійської державної агротехнічної академії. Мелітополь, 2001, вип.1.т.23. С.45–49.

9. Волик Р.Н. Влияние упругости частиц на рыхление зернового слоя при вибрации. Вестник сельскохозяйственной науки. М.,1962. №10. С.63–66.
10. Гончаров Е.С., Прилуцкий А.Н. Технологические основы процесса разделения семян по плотности способом пневмовибрацентрифугирования: Механизация и электрификация сельского хозяйства. К.: Урожай.1980. Вып.47. С.17–27.
11. Дринча В.М., Суконкан Л.М. Исследование параметров вибропневмосепараторов с прямоточной декой: Техника в сельском хозяйстве. 1997. №5. С.13–15.
12. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279с.
13. Гольдин Е.М. О движении материальной точки внутри быстровращающегося конуса: Известия АН СССР, ОТН, Механика.1955. №6.
14. Дринча В.М. Проблема качества семян и пути его повышения сепарирующими рабочими органами:Международный сельскохозяйственный журнал. М.: 1995. №3. С. 37-39.
15. ГОСТ 10467–76–ГОСТ10470–76. Семена зерновых культур. Сортовые и посевные качества: Государственные стандарты СССР. М.: Изд-во Стандартов.1979. 24с.
16. Бейлин М.И., Либина Б.И. Теория движения материала в барабане непрерывно действующей центрифуги: Химическое машиностроение, 1940. №7. С. 3–9.
17. Берг Б.А. Движение материальной точки по наклонной плоскости с трением совершающей круговое поступательное движение. Теория конструкция и расчет с–х машин. М.:Сельхозиздат, 1936. т.3. С. 522–539.
18. Блехман И.И., Гортинский В.В., Птушкина Г.Е. Движение частицы в колеблющейся среде при наличии сопротивления типа сухого трения:Известия АН СССР. Механика и машиностроение. 1963. №4. С.32–38.
19. Блехман И.И., Хайман В.Я. О теории разделения сыпучих смесей:

Известия АН СССР. Механика, 1965. №5, С.21–30.

20. Блохин П.В. Аэрогравитационный транспорт. М. Колос, 1974. 126с.

21. Бок Н.Б., Кузьмин Т.Т. Интенсификация сепарирования зерна цилиндрическими решетками: Земледельческая механика. М.: Машиностроение. 1968. С.24–27.

22. Бочкарев А.И. Виброцентрифугирование зерновых смесей: Механизация и электрификация социалистического хозяйства, 1962. №2. С.36–38.

23. Бредихін В.В. Теоретичні основи вібропневмовідцентрового розділення насінневих матеріалів за густиною насіння: монографія. Харків, 2017. 81 с.

24. Олейников В.Д., Кузнецов В.В. Коническое решето для предварительной очистки зерна: Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. К.: Урожай, 1968. №9. С.18–20.

25. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереносных процессов обогатительной технологии. Ленинград: Недра. 1973. 238с.

26. Гончаров Е.С. Теория неустойчивого движения зерна по поверхности вертикальных цилиндрических центробежновибрационных решет: Механизация и электрификация сельского хозяйства. К.: Урожай, 1973. Вып.25. С.39–44.

27. Гортинский В.В., Демский А.Б., Борискин М.А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304с.

28. Забродский С.С. Гидродинамика и теплообмен в псевдооживлении. М.: ГЭИ. 487с.

29. Дервянко Д.А. Вплив технічних засобів та технологічних процесів на травмування і якість насіння: монографія. Житомир: ЖНАУ, 2015. 773 с.

30. Авдеев Н.Е., Странадко Г.Г. Центробежный сепаратор для предварительной очистки зерна: Тракторы и сельскохозяйственные машины. 1993. №3. С.17–21.

31. Ковенский Г.И., Тамарин А.И. Влияние вибрации на эффективную вязкость псевдооживленного слоя полимеров: Тепло-массоперенос в процессах сушки и термообработки. Минск. Наука и техника, 1979. С.170-176.

32. Идин М.А., Лейкин Я.И. К исследованию движения слоя сыпучего материала на горизонтальной ситовой колеблющейся поверхности с анизотропным трением: Труды ВНИИЗ.М.: 1974. Вып.78. С.91–98.

33. Центрифуга непрерывного действия. А.с. 65526 СССР/ Л.М. Мандрыко (СССР). Оpub. 1964, Бюл. №19.

34. Гончаров Е.С. Экспериментальное исследование закономерностей движения частиц зерновых материалов по поверхности центробежно–вибрационных решет: Механизация и электрификация сельского хозяйства. К.: Урожай, 1964. Вып. С.9–14.

РОЗДІЛ 5

ТЕХНОЛОГІЇ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Принципи сепарації зернових сумішей ґрунтуються на відмінності фізико-механічних властивостей частинок суміші. Основні фізико-механічні властивості: довжина, ширина, товщина, форма, аеродинамічні властивості, пружність, коефіцієнт тертя, шорсткість, питома вага, електрофізичні властивості. При виборі способу поділу суміші в першу чергу враховують ознаки, за якими забезпечується найбільш повний поділ вихідної суміші на фракції із заданими показниками якості.

В останні роки в Україні все більше приділяється уваги енергоефективності процесів сепарації зернових сумішей, а саме розробці гравітаційних сепараторів насінневих сумішей, що не потребують витрат енергії на процес сепарації. Одним з напрямів розробки та удосконалення процесів і засобів з використанням сил гравітації, який заслуговує особливої уваги є напрям гравітаційної сепарації зерна за пружними властивостями компонентів суміші. Це пояснюється наступним. По-перше, пружні властивості багатьох сільськогосподарських культур взагалі не вивчалися. По-друге, пружні та щільні зерна мають більш високі посівні та технологічні якості. Втретє, внутрішня структура зерна підлягає меншій мінливості ніж, наприклад, розміри і має високу кореляцію зі щільністю та пружністю зерна, а завдяки меншій мінливості пружних властивостей ніж інших ознак сепарації, можна сподіватись на кращу стабільність процесу та кращі посівні якості зерна відсепарованого за пружними властивостями.

5.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАСТИНОК ЗЕРНА

Під пружністю насіння, як і інших тіл, розуміють їхню властивість відновлювати свою первісну форму. Більшістю дослідників [1 – 7] пружність

насіння оцінюється за допомогою коефіцієнта відновлення швидкості при ударі, що визначається, як відношення швидкості насіння після удару до швидкості до удару, або, без урахування опору повітря, як корінь квадратний із відношення висоти підскоку насіння до висоти падіння без початкової швидкості.

Деякими дослідниками пружність насіння оцінювалась по дальності відскоку насіння від похилої поверхні, що відбиває [5, 6].

В обох випадках метод визначення пружних властивостей насіння є непрямим і недостатньо точним, оскільки на коефіцієнт відновлення швидкості істотно впливає форма насіння, а на дальність відскоку – ще й коефіцієнт миттєвого тертя при ударі.

Разом з тим спосіб сепарації сумішей за пружними властивостями є найменш вивченим, і сепараторів, за пружними властивостями практично не розроблено.

Крім того, пружність насіння істотно впливає на процеси сепарації практично всіх машин, що сепарують, особливо вібраційних, так як вони працюють в динамічному режимі, що допускає безпосередній контакт зерна з вібруючими або ударними деками.

Для визначення коефіцієнта відновлення швидкості після удару інструментальним методом та оцінки параметрів дотику зерна і поверхні, що відбиває, була створена установка, принципова схема вимірювань якої показана на рис. 5.1.

Зерно 3 міститься на площині 4 (метал, фанера та ін.) і стискається силою F . При цьому сила F визначається силовимірювальним пристроєм 1, а переміщення, що характеризують змінання стику поверхонь, пристроєм 2. Зі схеми видно, що показання пристрою вимірювання змінання слід ділити на 2 для вивчення удару, і брати цілими для визначення модуля Юнга.

На рис. 5.2. Як приклад показано криву навантаження зерна гороху для підкладок з металу (сталь) і технічної фанери. По сталі зерна орієнтувалися в одному випадку при дії сил стиснення вздовж розділу половинок (крива 2), в

іншому – поперек діючих сил стиснення (крива 1). Відмінність пружних показників пов'язано, очевидно, з розсуненням половинок у поперечному напрямі. Як видно, залишкове змінання у всіх випадках досить велике.

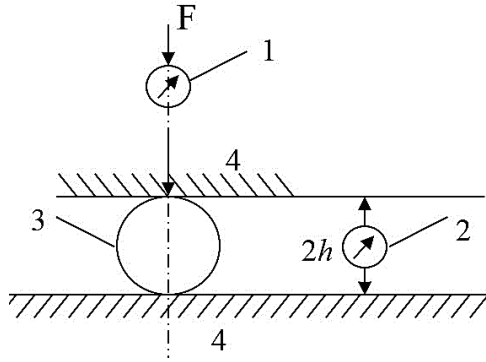


Рис. 5.1. Схема вимірювань пружних характеристик зерна і стінки, що відбиває:

1 – силівимірювальний пристрій; 2 – пристрій для вимірювання величини змінання; 3 – зерно; 4 – поверхня стиснення

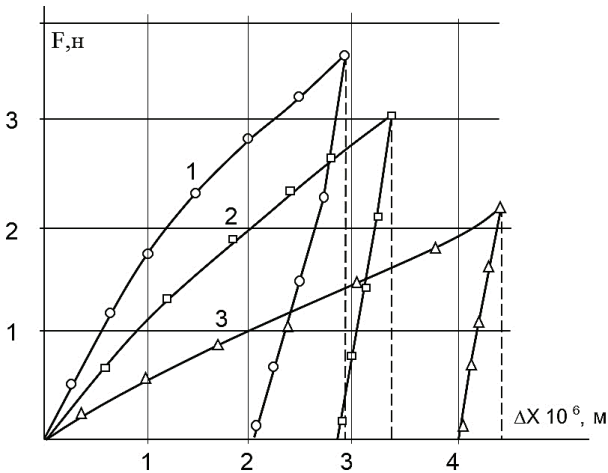


Рис. 5.2. Пружні характеристики зерна гороху: 1 —○— горох сталі з орієнтацією $\begin{matrix} \downarrow \\ \circ \\ \uparrow \end{matrix}$; 2 —□— горох сталі з орієнтацією $\begin{matrix} \downarrow \\ \square \\ \uparrow \end{matrix}$; 3 —△— горох за фанерою з довільною орієнтацією

У процесі зняття пружних характеристик сталі проводилися додаткові вимірювання плями контакту для визначення модуля Юнга. З цією метою область зіткнення злегка зафарбовувалася сухою крейдою. При цьому на підкладці після зняття навантаження (стиснення) залишався крейдяний слід, розмір якого вимірювався за допомогою інструментального мікроскопа з точністю $\pm 0,01$ мм. Виміри показали, що середнє значення діаметра плями $2a^*$ зіткнення області при навантаженнях порядку 10 Н становлять $1 \pm 0,03$ мм. Використовуючи отримані дані, а також відоме співвідношення:

$$p = E\varepsilon, \quad (5.1)$$

де: p – напруга, Па;

ε – відносна деформація,

визначимо модуль Юнга:

$$E = \frac{p}{\varepsilon}, \quad (5.2)$$

за наступних вихідних даних:

$$\begin{aligned} a_* &= 0,5 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}; \\ \varepsilon &= \frac{h_c}{2R_1} = \frac{h_c}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 166,7 h_c; \\ p &= \frac{F}{\pi \cdot a_*^2} = \frac{F}{78,54} \cdot 10 \text{ Па}. \end{aligned}$$

З кривої пружності для гороху маємо:

$$h_c = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}, \quad F = 11,8 \text{ Н}.$$

В результаті отримаємо:

$$\varepsilon = 1,33 \cdot 10^{-2}, \quad p = 0,15 \cdot 10^8 \text{ Па.}$$

Звісно, $E = 1,13 \cdot 10^9$ Па. Аналогічно для пшениці $E = 0,23 \cdot 10^9$ Па (довгою осі), для проса $E = 0,61 \cdot 10^9$ Па.

До коефіцієнта Пуассона σ обчислимо згідно:

$$\sigma = \frac{1}{2} \cdot \frac{3 \cdot k - 2 \cdot \mu}{3 \cdot k + \mu}, \quad (5.3)$$

де: k – модуль всебічного стискування, Па;

μ – модуль зсуву, Па.

Для порівняння в табл. 5.1 представлені модулі Юнга, зсуву та коефіцієнт Пуассона для різних матеріалів.

Таблиця 5.1

Пружні характеристики для різних матеріалів

Речовина	Модуль	Модуль	Коефіцієнт Пуассона
	ДПА	ДПА	
Сталь	200	76	0,27
Фанера	12	-	0,2
Горох	1,13	-	0,45
Пшениця	0,23	-	0,45
Просо	0,61	-	0,45

Оскільки зерна, наприклад гороху, при нормальній вологості (8-12 %) досить тендітні, то, мабуть, модуль зсуву досить малий і можна прийняти $\mu \rightarrow 0$. Тоді σ прагне значення 0,5 знизу. Очевидно, й інших культур за нормальної вологості значення σ буде близько до цього значення. Прийmemo $\sigma = 0,45$. У

сфері ударних навантажень, як впливає з рис. 5.2, криву навантаження-розвантаження з достатнім ступенем точності можна подати у вигляді, показаному на рис. 5.3. Коефіцієнти регресії лінеаризованого навантаження-розвантаження представлені в табл. 5.2.

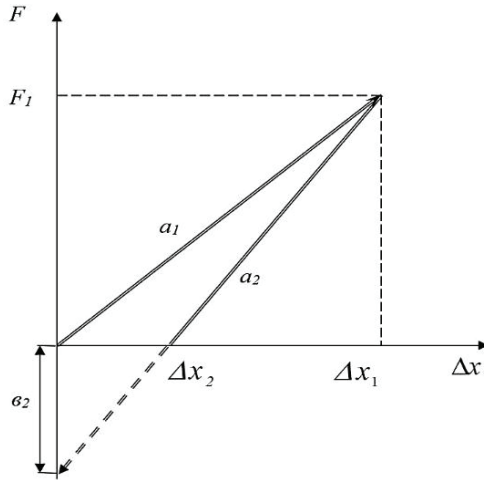


Рис. 5.3. Графік лінеаризованого навантаження-розвантаження:

a_1 і a_2 – коефіцієнти регресії, що мають розмірність жорсткості;
 F_1 – стискаюча сила; Δx – деформація

Таблиця 5.2

Коефіцієнт регресії навантаження-розвантаження для різних культур по сталі

Орієнтація	Підкладка, культура	$a_1 \cdot \left(\frac{H}{m} \cdot 10^6\right)$	$a_2 \cdot \left(\frac{H}{m} \cdot 10^6\right)$	b_2
⊖	Пшениця	4,58	34,52	-1556
∅	Пшениця	0,93	7,4	-1098
⊕	Горох	4,12	14,76	-420
⊕	Горох	2,36	5,67	-320
	Просо	6,4	34,7	-366
	Гречка	0,98	1,16	-25

Складемо рівняння згідно із законом збереження енергії. Кінетична енергія частинки, що ударяється, до удару $\frac{mV_1^2}{2}$ витрачається на потенційну енергію деформації $F_l \Delta x_l$, і на збудження пружних коливань у матеріалі відбиває стінки $\frac{1}{3} F_l \Delta x_l$:

$$\frac{mV_1^2}{2} = F_l \Delta x_l + \frac{1}{3} F_l \Delta x_l = \frac{4}{3} F_l \Delta x_l. \quad (5.4)$$

У фазі розвантаження (тобто віддачі) потенційна енергія, що залишилася, $F_l(\Delta x_l - \Delta x_2)$ перетворюється на кінетичну енергію відскоку частки (див. рис. 5.3):

$$\frac{mV_2^2}{2} = F_l(\Delta x_l - \Delta x_2). \quad (5.5)$$

Вирішуючи спільно рівняння (5.4) і (5.5), знаходимо для гороху:

$$\sqrt{\frac{V_2^2}{V_1^2}} = R_y = \sqrt{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\Delta x_2}{\Delta x_l}} = 0,87 \sqrt{1 - \frac{\Delta x_2}{\Delta x_l}}, \quad (5.6)$$

де: R_y – коефіцієнт відновлення швидкості.

Вирішуючи спільно рівняння регресії навантаження $F = ax_1 + b_1$ і рівняння регресії розвантаження $F = ax_2 + b_2$ отримаємо координати точок перетину Δx_l і $(b = 0)$ використовуємо їх для обчислення коефіцієнта відновлення за допомогою формули (5.6).

Для гороху з орієнтацією при дії сил стиснення вздовж розділу половинок $R_y = 0,56$, і з орієнтацією впоперек чинних сил $R_y = 0,46$.

Таким чином, маючи пружні характеристики навантаження-розвантаження зерен на різних підкладках, відповідних матеріалу відбиває стінки або деки, можна залишковою деформацією для матеріалу зерна обчислити коефіцієнт відновлення швидкості при ударі.

5.2. ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ЗА ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Серед різних параметрів, що визначають поділ сипких сумішей, найменш вивченим є пружність зерна. Частково цей параметр використовується у відбивних сортувальних столах, так званих падді-машинах. Однак наявність інших розділових ознак (форми, коефіцієнтів тертя і т.п.) не дозволяє достатньою мірою використовувати пружність зерен, як параметр поділу по стиглості та доброякісності зерна.

З усіх можливих варіантів використання пружності, як критерію сортування зерна, і насінневих сумішей і критерію поділу суміші зерна бур'янів і домішок, найбільш ефективним є явище удару, причому удару практично в чистому вигляді, без ковзання і перекочування по площині або іншій поверхні [8].

Явище зіткнення тіл розглянуто багатьма авторами [9 – 14]. Не вдаючись до подробиць теорії удару, використовуємо її стереомеханічну модель, засновану на гіпотезі сухого тертя, яка встановлює зв'язок тангенціальних та нормальних імпульсів відповідно до закону Амонтона-Кулона, що має найбільш природну фізичну основу.

Розглянемо косий удар частинки об нерухому стінку (рис. 5.4), використовуючи загальноприйняті позначення [15].

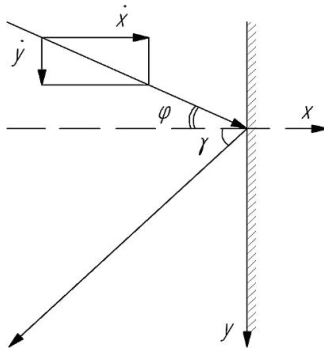


Рис. 5.4. Траскторія руху частинки при ударі об нерухому стінку

По теоремі імпульсів для фази ударного навантаження маємо:

$$I_{1x} = -m\dot{x}; \quad (5.7)$$

$$I_{1y} = m(\dot{y}_0 + \dot{y}), \quad (5.8)$$

де: m – маса частки, кг;

\dot{y}_0 – швидкість ковзання в момент закінчення фази навантаження, м/с.

Відповідно до прийнятої гіпотези Амонтона-Кулона:

$$I_{1y} = \theta_T \cdot I_{1x}, \quad (5.9)$$

де: θ_T – коефіцієнт миттєвого тертя, що часто приймається як коефіцієнт тертя ковзання.

Підставляючи (5.7) і (5.8) до (5.9), отримаємо:

$$\dot{y}_0 = \dot{y}_- - \theta_T \cdot \dot{x}_-. \quad (5.10)$$

Тангенціальна швидкість у момент удару не може змінити напрям, отже $\dot{y}_- \geq 0$. З (5.10) знаходимо:

$$\frac{\dot{y}_-}{\dot{x}_-} \geq \theta_T. \quad (5.11)$$

Це відношення називають умовою відсутності самогальмування. У разі коли воно не виконується або виконується на границі, тангенціальне переміщення припиняється вже в першій фазі удару (навантаження). І частка відскакує від нормалі до стінки.

Якщо цього немає, то після закінчення другої фази (розвантаження)

$$I_{2x} = m\dot{x}_+, \quad I_{2y} = m(\dot{y}_+ - \dot{y}_0). \quad (5.12)$$

Враховуючи, що $\frac{I_2}{I_1} = R_y$,

де: R_y – коефіцієнт відновлення, отримуємо:

$$\dot{y}_+ = \dot{y}_- - \theta_T \cdot \dot{x}_- (1 + R_y). \quad (5.13)$$

З урахуванням $\dot{y}_+ > 0$ отримуємо умову відсутності самогальмування під час удару:

$$\frac{\dot{y}_-}{\dot{x}_-} > \theta_T (1 + R_y). \quad (5.14)$$

Для середніх значень, що часто зустрічаються $\theta_T = 0,4$, $R_y = 0,4$ і

$\frac{\dot{y}_-}{\dot{x}_-} = \operatorname{tg} \varphi_{\text{ск}}$ отримуємо граничний кут $\varphi_{\text{ск}}$, при якому удар буде з ковзанням, приблизно рівним 30° .

Таким чином, при кутах падіння, менших 30° , відбиття частки від стінок відбувається за нормаллю, і, отже, поділ буде неоднозначним.

Обчислимо кут відбиття, враховуючи (5.13) та $\dot{x}_+ = -R_y \dot{x}_-$.

З рис. 5.4 випливає, що

$$\dot{y}_- = V \sin \varphi, \quad \dot{x}_- = V \cos \varphi, \quad (5.15)$$

тоді:

$$\operatorname{tg} \gamma_{omp} = \frac{\dot{y}_+}{\dot{x}_+} = \frac{1}{R_y} \operatorname{tg} \gamma_{omp} - \frac{1 + R_y}{R_y} \theta_T, \quad (5.16)$$

де: γ_{omp} – кут відбиття, що відраховується від нормалі у бік руху, рад.

З (5.16) маємо

$$\gamma_{omp} = \operatorname{arctg} \frac{1}{R_y} [\operatorname{tg} \varphi - (1 + R_y) \theta_T]. \quad (5.17)$$

Цей вираз дозволяє проаналізувати вплив коефіцієнта відновлення R_y на кут відбиття γ_{omp} . На рис. 5.5 представлені залежності $\gamma_{omp}(R_y)$ при різних коефіцієнтах тертя θ_T . Як бачимо, найбільше зниження γ_{omp} проявляється у інтервалі зміни R_y від 0,05 до 0,4. Таким чином, підбираючи матеріал стінки, щоб θ_T потрапляв у цей інтервал, можна досягати найбільшої чутливості поділу від параметра R_y . Оскільки коефіцієнт відновлення є функцією пружною і диссипативної сил, можна стверджувати, що поділ насіння за пружністю адекватний поділу за коефіцієнтом відновлення.

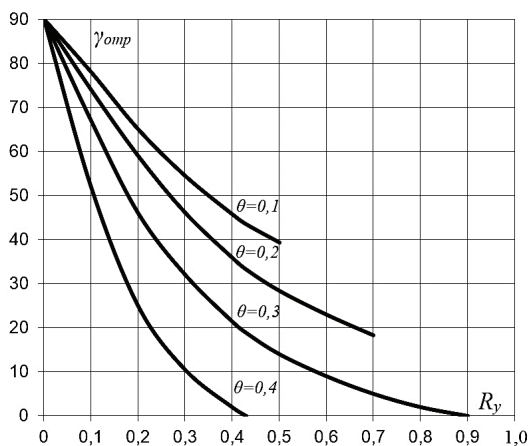


Рис. 5.5. Залежності кута γ_{omp} від R_y при різних значеннях θ_T

Необхідно відзначити, що найкращою є ситуація, коли $\theta_T = 0,3$ (рис. 5.5). Тут у всьому діапазоні змін R_y спостерігається досить висока чутливість та виконується умова відсутності самогальмування. Для випадку $\theta_T = 0,4$ поділ можливий лише в інтервалі $0,05 < R_y < 0,45$. На рис. 5.6 представлені залежності кута відбиття γ_{omp} від кута падіння φ . Видно, що слабка залежність кута відбиття від кута падіння спостерігається в діапазоні 30° від 60° .

Подальше збільшення кутів не має сенсу, тому що після відображення частка рухатиметься практично по стінці ($\gamma \approx 90^\circ$). Таким чином, в результаті відображення частинки з меншим R_y відхилитимуться на більший кут з меншою швидкістю. Якщо організувати багаторазові відображення, це відмінність буде пропорційно кількості циклів. Якщо встановити на деякій відстані L від перешкоди другу перешкоду у вигляді стінки (у напрямку відбиття, рис. 5.7), то траєкторії руху частинок будуть різними залежно від параметра R . Тут і далі передбачається, що частинки мають форму, близьку до кулястої (горох, просо тощо).

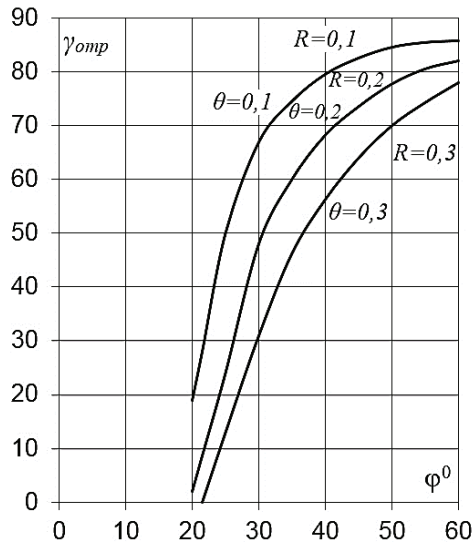


Рис. 5.6. Залежність кута відбиття від кута падіння

На рис. 5.7 спрощення траєкторії частинок умовно позначені прямими лініями, так як на таких відстанях відхилення від прямолінійності вважатимуться незначними.

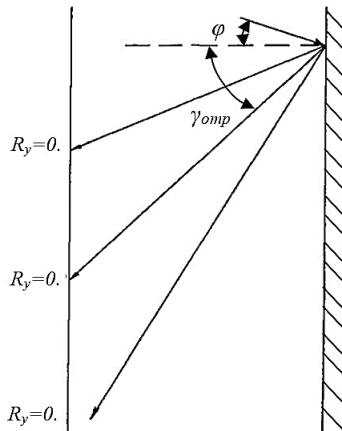


Рис. 5.7. Залежність траєкторії руху від параметра R_y

Встановлюючи проміжні перегородки відповідної висоти (рис. 5.8), можна розділяти частки на фракції за коефіцієнтом відновлення R_y .

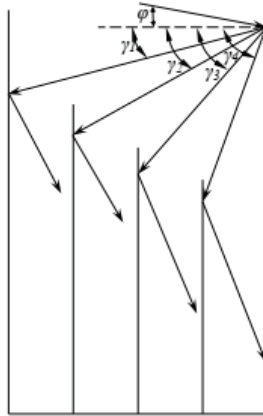


Рис. 5.8. Принципова схема поділу частинок при ударі об вертикальну перегородку

Окремим випадком косого удару є падіння частки на похилу площину (рис. 5.9).

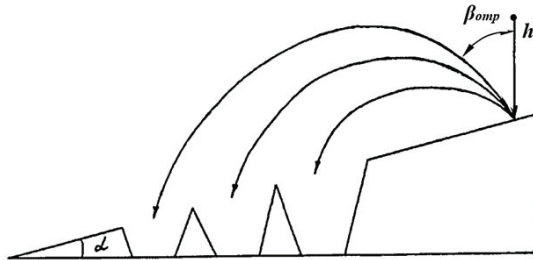


Рис. 5.9. Принципова схема поділу частинок при падінні на похилу площину

Відстань, яку частка пролітає після відображення, можна обчислити за співвідношенням:

$$S = 4R_y^2 h (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta_{\text{omp}}),$$

де: h – висота падіння, м;

α – кут нахилу площини, град;

β_{omp} – кут відбиття, град.

З урахуванням (5.16) отримаємо:

$$S = 4R_y (1 + R_y) h \sin \alpha - 4R_y^2 h (1 + R_y) \theta_T \cos \alpha, \quad (5.18)$$

де: θ_T – коефіцієнт тертя.

Наприклад, при $h = 1$ м, $\theta_T = 0,3$, $\alpha = 30^\circ$, $R_y = 0,4$, $S(0,3) = 0,345$ м, а $S(0,5) = 1,11$ м. Маючи в своєму розпорядженні приймальні ємності на різних відстанях від місця падіння, можна розділяти суміші за коефіцієнтом відновлення. Для підвищення продуктивності похилу площину можна замінити конусом, розташованим вершиною вгору. При цьому приймальні ємності слід розташовувати концентрично з віссю конуса. Розрахунок відстаней S слід вести згідно (5.18).

5.3. ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРУ КУЛЯСТОЇ ЧАСТИНКИ З ПЛОЩИНОЮ

Контакт зерна з декою повністю визначає поведінку його у процесі роботи. Однак при розрахунках режимів і динамічних параметрів цей контакт, як правило [4, 16], передбачається точковим, що істотно спотворює картину протікання процесу сепарації або очищення, так як це не дає можливості оцінити час взаємодії і площу зіткнення (пляма контакту) зернівки з декою. Але саме ці параметри і визначають, значною мірою, динаміку післяударного руху. Наприклад, у вібросепараторах з неперфорованою декою [4], особливо в режимі

з підкиданням, облік часу контакту частинки з декою дозволяє уточнити фазу початку польоту по відношенню до фази коливань деки, і, отже, точніше підібрати динамічні параметри режиму роботи машини. Ці міркування стосуються і суто ударних сепараторів [17, 18]. У зв'язку з цим розглянемо завдання про зіткнення частки і деки.

При поділі зернових сумішей за пружністю важливе значення має вибір матеріалу поверхні, що відбиває, так як пружні властивості різних матеріалів знаходяться в широких межах [19]. Пружні ж властивості зерна досліджені недостатньо повно, тому для вибору параметрів площини, що відбиває, з урахуванням пружних властивостей зерна розглянемо задачу про зіткнення двох тіл.

При зіткненні двох тіл (наприклад, зерна, що налітає, і нерухомої стінки) кінетична енергія ударяючого тіла у фазі навантаження перетворюється на потенційну енергію стиснення області зіткнення при ударі і енергію збудження пружних коливань (головним чином, звукових). Ці коливання збуджують пружні хвилі у вигляді загасаючих звукових хвиль. Енергія цих коливань носить дисипативний характер і на процес відбиття частки не впливає, оскільки безповоротно втрачається. Крім того, процес стиснення області зіткнення відбувається з втратою енергії за рахунок пластичної деформації та пружного гістерезису. Таким чином, сила, що відновлює, у фазі розвантаження при ударі не може бути обчислена з простого обміну енергією в процесі зіткнення.

Для оцінки кількісних співвідношень при ударі кулястої частинки об нерухому перешкоду розглянемо контактну задачу дотику двох твердих тіл. При цьому приймемо такі припущення.

1. Частина, що налітає (зерно) має кулясту форму і полікристалічну структуру, близьку до аморфної. У нашому випадку, межі пружності такого тіла значно менші, ніж у кристалічного.

2. Відбивна стінка є прямокутною пластиною з розмірами $a_n \cdot b_n$ і товщиною Δ .

3. Швидкість удару обмежується значеннями, що не допускають руйнування частки (зерна) і зміни її структурного стану. Допустимі значення швидкості вибрано в діапазоні 1...2 м/с.

4. Удар вважатимемо центральним, частково непружним і без урахування тертя у зоні дотику. Врахування тертя слід враховувати при косому ударі.

Обчислимо радіус r , сумарну деформацію h області зіткнення і час удару τ (час, протягом якого стикаються тіла).

Нехай два тіла стикаються у точці O (рис. 5.10,а). У цій точці обидві поверхні мають загальну дотичну площину, яку ми виберемо як площину x, y . Позитивний напрямок осі z умовимося вважати різним для обох тіл, – для кожного з них відраховуватимемо z координату у напрямку вглиб тіла, позначаючи її відповідно, як z і z' . Зауважимо, що площину можна вважати сферичною поверхнею з радіусом кривизни $R \rightarrow \infty$. У загальному випадку поблизу точки торкання координатної площини (x, y) рівняння поверхні може бути записане у вигляді [20, 21]:

$$z = \chi_{ij} x_i x_j,$$

де під індексом, що двічі повторюється, мається на увазі підсумовування за значеннями 1,2 ($x_1 = x, x_2 = y$), χ_{ij} є двовимірний симетричний тензор, що характеризує кривизну поверхні [22] (головні значення тензора χ_{ij} дорівнюють $\frac{1}{2R_1}$ і $\frac{1}{2R_2}$, де $R_1 - R_2$ головні радіуси кривизни поверхні в точці дотику).

Рівняння на поверхні другого тіла поблизу точки дотику запишемо у вигляді:

$$z' = \chi'_{ij} x_i x_j.$$

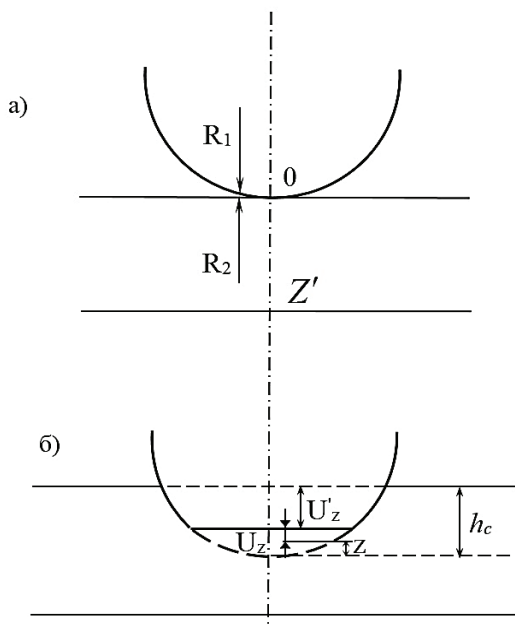


Рис. 5.10. Схема дотику кулястої частинки з площиною

Якщо обидва тіла здавлюються прикладеною силою F , то вони зближаться на деяку малу відстань h_c .

Тоді поблизу точки початкового зіткнення на поверхні тіл виникне втиск, і тіла стикаються вже не в одній точці, а по деякій малій, але кінцевій ділянці поверхні. Нехай u_z і u'_z компоненти векторів усунення точок поверхонь обох тіл при стисканні (рис. 5.10,б). Тут пунктирною лінією зображені поверхні тіл, якими були за відсутності деформації, а суцільною – поверхні здавлених тіл.

Як видно з малюнка, у всіх точках зіткнення:

$$(z + u_z) + u'_z = h_c.$$

У точках поза цією областю, де поверхні не стикаються, має місце нерівність:

$$z + u_z + u'_z > h_c.$$

Позначимо тиск між обома здавленими тілами в точках їхнього дотику за допомогою $P_z(x, y)$. Поза зоною дотику $P_z = 0$. З достатньою точністю при визначенні залежності між P_z зсувами u_z і u'_z можна розглядати поверхні тіл як плоскі. Опускаючи громіздкі обчислення [4] отримаємо:

$$u_z = \frac{1 - \sigma^2}{\pi \varepsilon} \iint \frac{P_z(x, y)}{r} dx dy, \quad (5.19)$$

$$u'_z = \frac{1 - \sigma'^2}{\pi \varepsilon'} \iint \frac{P_z(x, y)}{r} dx' dy', \quad (5.20)$$

де: σ , σ' и E , E' – коефіцієнти Пуассона і модулі розтягування – стиснення Юнга обох тіл.

Оскільки поза зоною дотику $P_z(x, y)$, то інтегрування проводиться тільки в цій області. З формул (5.19) і (5.20) випливає, що відношення u_z/u'_z постійно залежить тільки від властивостей матеріалів тіл:

$$\frac{u_z}{u'_z} = \frac{(1 - \sigma^2)E}{(1 - \sigma'^2)E'}. \quad (5.21)$$

Проводячи аналогію між теоріями пружності та потенціалу [16], можна зробити висновок, що область зіткнення тіл обмежена еліпсом виду $\frac{x^2}{a_k^2} + \frac{y^2}{b_k^2} = 1$

Функція $P_z(x, y)$ повинна мати вигляд:

$$P_z(x, y) = \text{const} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_\kappa^2} - \frac{y^2}{b_\kappa^2}}. \quad (5.22)$$

Вибираючи константу так, щоб $\iint P_z dx dy$ по області зіткнення дорівнював заданій повній силі F , з якою здавлюються обидва тіла, отримаємо:

$$P_z(x, y) = \frac{3F}{2\pi a_\kappa b_\kappa} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_\kappa^2} - \frac{y^2}{b_\kappa^2}}. \quad (5.23)$$

Ця формула визначає закон розподілу тиску площею області зіткнення.

Після перетворень, остаточно отримаємо:

$$\frac{FD}{\pi} \int_0^\infty \frac{1 - \frac{x^2}{a_\kappa^2 + \xi} - \frac{y^2}{b_\kappa^2 + \xi}}{\sqrt{(a_\kappa^2 + \xi)(b_\kappa^2 + \xi)}\xi} d\xi = h - A_1 x^2 - B_1 y^2, \quad (5.24)$$

$$\text{де: } D = \frac{3}{4} \left(\frac{1 - \sigma^2}{E} + \frac{1 - \sigma'^2}{E'} \right).$$

Ця рівність має виконуватися тотожно всередині еліпса дотику при всіх x і y значеннях. Тому повинні бути попарно рівні окремо при x і y вільні члени в обох рядках рівності. Маємо:

$$h = \frac{FD}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\xi}{\sqrt{(a_\kappa^2 + \xi)(b_\kappa^2 + \xi)}\xi}, \quad (5.25)$$

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \frac{FD}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\xi}{(a_\kappa^2 + \xi)\sqrt{(a_\kappa^2 + \xi) \cdot (b_\kappa^2 + \xi)}}, \\
 B_1 &= \frac{FD}{\pi} \int_0^\infty \frac{d\xi}{(b_\kappa^2 + \xi)\sqrt{(a_\kappa^2 + \xi) \cdot (b_\kappa^2 + \xi)}}.
 \end{aligned}
 \tag{5.26}$$

Рівняння (5.26) визначають півосі a і b області зіткнення кулі за силою F , а співвідношення (5.25) – залежність між силою F і, що викликається зближенням тіл h .

Для випадку зіткнення кулі та площини: $A_1 = B_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$ і $a_\kappa = b_\kappa$

виходить, що зіткнення є коло. З (5.26) отримуємо радіус цього кола:

$$a_{sp} = F^{1/3} \left(D \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^{1/3}.$$

При $R \rightarrow \infty$ отримаємо:

$$a_\kappa = F^{1/3} (DR_1)^{1/3}. \tag{5.27}$$

Аналогічно

$$h_c = F^{2/3} \left[\frac{D^2}{R_1} \right]^{1/3}. \tag{5.28}$$

Знайдемо також потенційну енергію дотичних тіл, враховуючи, що $(-F) = -\frac{\partial u}{\partial h}$, тобто $u = \int_0^h F dh$, отримаємо:

$$u = h_c^{5/2} \frac{2}{5D} \sqrt{R_1}. \tag{5.29}$$

Визначимо максимальне зближення h_0 і час τ , протягом якого триває зіткнення двох тіл, що співударяються, за умови, що швидкість V зіткнення значно менше швидкості звуку в тілах, що співударяються. Ця умова завжди

здійснення в практиці роботи очисних і сепаруючих машин, так як згадані швидкості відрізняються один від одного, принаймні на 2–3 порядку.

До зіткнення кінетична енергія тіла, що ударяє, дорівнює $\frac{mV^2}{2}$. Протягом зіткнення повна енергія дорівнює сумі кінетичної енергії $\frac{m\dot{h}_c^2}{2}$ та потенційної енергії (5.29). В силу закону збереження енергії:

$$\begin{aligned}\frac{mV^2}{2} &= \frac{m\dot{h}_c^2}{2} + \frac{kh_c^{5/2}}{2}, \\ mV^2 &= m\dot{h}_c^2 + kh_c^{5/2},\end{aligned}\tag{5.30}$$

де:

$$k = \frac{4}{5D}\sqrt{R_1}.$$

Максимальне зближення (сумарна деформація h_0) відповідає моменту, коли $\dot{h} = 0$. Тоді:

$$h_{0c} = \left(\frac{m}{k}\right)^{2/5} V^{4/5}.\tag{5.31}$$

Час τ , протягом якого триває зіткнення, тобто h змінюється від 0 до h_0 і назад, обчислюємо з (5.30):

$$\begin{aligned}\left(\frac{dh_c}{dt}\right)^2 &= V^2 - \frac{k}{m}h_c^{5/2}, \\ \frac{dh_c}{dt} &= \sqrt{V^2 - \frac{k}{m}h_c^{5/2}}, \\ dt &= \frac{dh_c}{\sqrt{V^2 - \frac{k}{m}h_c^{5/2}}},\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_c &= 2 \int_0^{h_0} \frac{dh_c}{\sqrt{V^2 - \frac{k}{m} h_c^{5/2}}} = 2 \left(\frac{m^2}{k^2 V} \right)^{1/5} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^{2/5}}} = \\ &= \frac{4\sqrt{\pi} \Gamma(2/5)}{5\Gamma(9/10)} \left(\frac{m^2}{k^2 V} \right)^{1/5} = 2,94 \left(\frac{m^2}{k^2 V} \right)^{1/5}. \end{aligned} \quad (5.32)$$

Необхідно відзначити, що вираз для h_0 з (5.31) точно відповідає фазі навантаження при зіткненні реальних тіл. При розвантаженні в силу набуває пружне післядія, внаслідок чого сила, що відновлює, пропорційна не h_0 , а деякому значенню $h_{0c} = a_n h_0$, де $a_n < 1$.

Як відомо [23], крива навантаження – розвантаження реального тіла має вигляд петлі пружного гістерезису (рис 5.11). Як видно, $h'_{0c} = h_{0c} - h_c$, враховуючи що $h'_{0c} = \alpha \cdot h_{0c}$,

отримаємо:
$$\alpha_n = \frac{h_{0c} - h_c}{h_{0c}}.$$

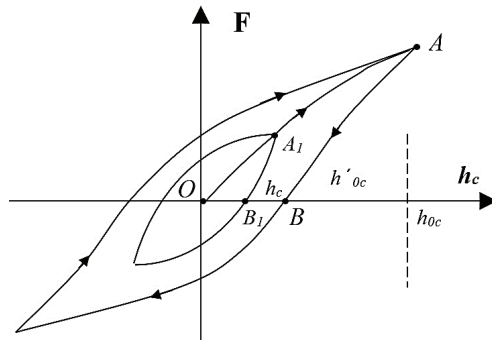


Рис. 5.11. Пружний гістерезис реального тіла: F – стискаюча сила, h_c – деформація

Тоді

$$h'_{0c} = \left(1 - \frac{h_{1c}}{h_{0c}}\right) \cdot h_{0c}. \quad (5.33)$$

Очевидно, що реалізувати всю петлю гистерези при ударі неможливо. Деформацію у разі зображують лінії OAB у першому квадранті. Слід зазначити, що залежно від сили F реалізуються також і часткові цикли OA_1B_1 тощо, оскільки площа петлі гістерезису характеризує втрати енергії на деформацію, то площа фігури $OABO$ (OA_1B_1O) визначає втрати енергії під час удару тіла об перешкоду.

Обчислимо значення a, h_0, τ і u за наступних вихідних даних [24]:

$$R_1 = 3\text{мм} = 3 \cdot 10^{-3}\text{ м}; \quad E = 200 \cdot 10^9\text{ Па (сталь)}$$

$$m = 14 \cdot 10^{-6}\text{ кг}; \quad E' = 1,33 \cdot 10^9\text{ Па (горох)}$$

$$V = 1\text{М}/\text{с}; \quad \sigma = 0,27\text{ (сталь)}; \quad \sigma' = 0,45\text{ (горох)}$$

$$a^* = 0,5\text{мм} = 0,5 \cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

Згідно (5.31), (5.32), (5.29) отримаємо значення

$$h_{0c} = 16 \cdot 10^{-6}\text{ м},$$

$$\tau = 46,9 \cdot 10^{-6}\text{ с},$$

$$u = 49,39 \cdot 10^{-6}\text{ Дж},$$

Використовуємо відоме співвідношення [25]: $2mV = F\tau$;

для обчислення сили удару:

$$F = \frac{2mV}{\tau} = 6\text{ Н}.$$

Тоді згідно (5.27) отримаємо:

$$a = 0,14 \cdot 10^{-3}\text{ м}.$$

Обчислимо співвідношення прогинів контактуючих тіл згідно (5.21). В результаті отримаємо:

$$h_c = 0,0077 h'_c, \quad (5.34)$$

де: h_c – прогин стінки, що відбиває

h'_c – прогин частки (на прикладі гороху).

З геометричних міркувань $h_{0c} = h_c + h'_c$. З урахуванням (5.34) маємо:

$$h'_c = \frac{0,0077}{1,0077} \cdot h_{0c} = 0,1222 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

При ударі частки про перешкоду в останній збуджуються пружні коливання в широкому діапазоні частот, субгармоніки яких часто чути як звук.

Для обчислення енергії пружних коливань визначимо частоту власних коливань стінки, що відбиває, наприклад зі сталі, з розмірами $a_n = b_n = 10^{-2}$ м, товщина $\Delta = 3 \cdot 10^{-3}$ м з опорними краями. Відповідно до [26] частота основного тону ($m = n = 1$) визначається рівністю:

$$\omega_0 = \Delta \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{12\zeta \cdot (1 - \sigma^2)}} \cdot \pi^2 \cdot \left[\frac{1}{a_n^2} + \frac{1}{b_n^2} \right]. \quad (5.35)$$

З урахуванням геометричних та пружних параметрів отримаємо:

$$\omega_0 = 0,9522 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \cong 1500 \text{ Гц.}$$

Тоді енергія коливань [27]:

$$u_1 = (h'_c) \cdot \omega_0^2 \cdot \frac{\rho}{2} \cdot V_c,$$

де: h'_c – прогин області зіткнення, м;

ρ_m – щільність матеріалу, $7,5 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$,

V_c – об'єм стінки, що відбиває, м^3 .

В результаті отримаємо $u_1 = 15,3 \cdot 10^{-6}$ Дж.

Як бачимо, енергія пружних коливань становить $\cong \frac{1}{3}$ від енергії деформації ($49,39 \cdot 10^{-6}$ Дж).

5.4. ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБОЛОНКИ ЗЕРНА НА ПРУЖНІСТЬ ПРИ УДАРІ

Фізико-механічні властивості насіння залежать від багатьох факторів: сортів насіння, умов вирощування, режимів збирання, очищення, сушіння та ін. Наприклад, при обмолоті, транспортуванні зерна, порушенні режимів сушіння в оболонці можуть відбутися мікро- і макротріщини, її відшарування від зернівки [28].

Пошкодження оболонки насіння призводить до погіршення їх якості, винятком є скарифікація насіння безпосередньо перед посівом, тому виділення пошкодженого насіння з основного вороху є, безумовно, важливим та актуальним завданням. Розв'язання цього завдання пов'язане з науковими та практичними завданнями забезпечення необхідної якості насіння, що використовується, як в якості посівного матеріалу, так і переробної сировини.

Сепарація зернових сумішей здійснюється на підставі різниці їх фізико-механічних властивостей (розмірів, форми, пружності та інших). При цьому здебільшого вплив фізико-механічних властивостей на ефективність поділу проявляється в сукупності. Тому виявлення вкладу кожного параметрів може суттєво вплинути на якість сепарації ще при проектуванні сепаратора [4].

Коефіцієнт відновлення швидкості при ударі об деку сепаратора значно впливає на процес сепарації, зокрема, у вібросепараторах у двоударному режимі

та в режимі з підкиданням, падди-машинах та інших пристроях для поділу сипких матеріалів.

У другому розділі отримано залежності для обчислення коефіцієнта відновлення швидкості матеріалу при ударі. Однак багато зерен мають слабоскріплену із зерном оболонку. Як правило, скріплення оболонки із зерном низьке у травмованих, недостатньо розвинених зерен, наявність яких у суміші знижує якість зерна, їх виділення при очищенні є актуальним і проблемним завданням, оскільки розмірні та аеродинамічні характеристики їх практично не відрізняються від повноцінних зерен [29].

У процесі удару оболонка відчуває ударний імпульс першої (раніше основної маси) і суттєво впливає на розподіл навантаження при ударі, що, зрештою, впливає на визначення коефіцієнта відновлення швидкості при ударі. У зв'язку з цим доцільно розглянути завдання про деформації оболонки на етапі навантаження під час дії якого відбувається перерозподіл енергії удару на компоненти. Тому дані про втрати енергії на стиск (або руйнування) оболонки дозволять з більшою точністю оцінити коефіцієнт відновлення швидкості при ударі, який відіграє важливу роль у розрахунках параметрів віброударних сепараторів.

Оскільки зв'язки оболонки з ядром досить слабкі, то першій фазі удару протягом деякого часу оболонку слід вважати вільною від цих зв'язків і завдання можна вирішувати, вважаючи оболонку ізольованою від ядра. При цьому необхідно зробити такі припущення. У зв'язку з тим, що форма зерна значно відрізняється від циліндричної практично у всіх випадках, вирішуватимемо завдання, виходячи з припущення, що поверхню оболонки можна розбити на досить велику кількість елементарних циліндрів, а потім отриманий результат проінтегрувати. Таким чином, для елементарного циліндра з довжиною утворюючої ΔL та товщиною δ при радіусі R буде мати розрахункову схему, наведену на рис. 5.12.

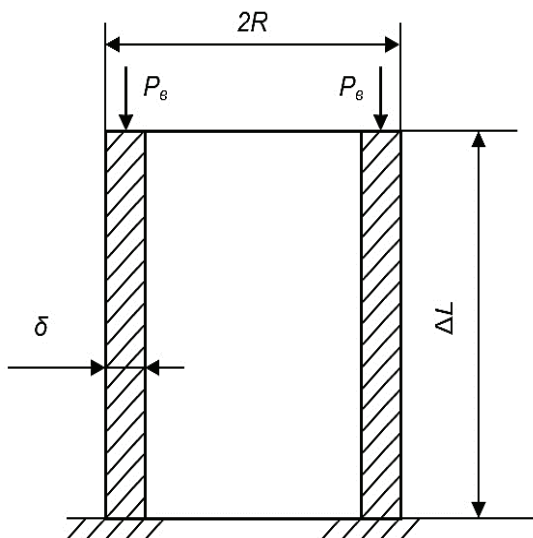


Рис. 5.12. Розрахункова схема навантаження оболонки

З досвіду відомо, що така оболонка при певному навантаженні може втратити стійкість, тобто за межами пружних деформацій утворюючи циліндра (прямолінійні) стануть кривими. Найменше навантаження, за якого можлива втрата стійкості, у літературі [30] називається верхнім критичним навантаженням. Позначимо його P_c . Знайдемо величину P_c та з'ясуємо характер зміни форми поверхні в момент застосування критичного навантаження.

Введемо на поверхні оболонки криволінійні координати X, Y , Приймаючи за лінії X прямолінійні утворюючі, а за лінії Y – кругові перерізи, перпендикулярні осі X . Як координати X, Y приймемо відстань уздовж координатних ліній. Початок відліку помістимо на краю оболонки (рис. 5.13).

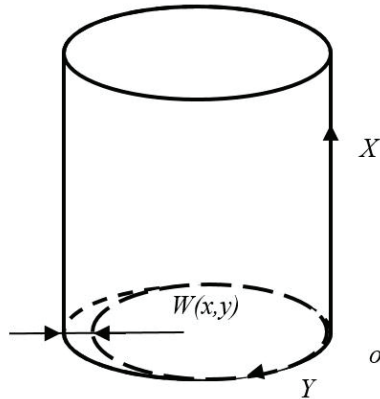


Рис. 5.13. Деформація оболонки у криволінійній системі координат

Досвід показує [31], що в результаті втрати стійкості навантаження, що сприймається оболонкою, знижується і подальші деформації відбуваються без збільшення зовнішнього навантаження.

У лінійній теорії [31] доведено, що радіальний прогин $W(x, y)$ оболонки в момент втрати стійкості задовольняє рівняння приватних похідних:

$$\frac{D}{\delta} \Delta \Delta \Delta \Delta W + \frac{E}{R^2} \cdot \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} + \frac{9R}{\delta} \Delta \Delta \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (5.36)$$

де: D – жорсткість оболонки на вигин [$\text{Па} \cdot \text{м}^3$]: $D = \frac{E \cdot \delta^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)}$;

E – модуль пружності, Па;

Δ – оператор Лапласа: $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$,

μ – коефіцієнт поперечного стиску (Пуассона).

Припускаючи регулярність функції $W(x, y)$, розкладемо її в ряд:

$$W_{(xy)} = \sum_{m,n} \left(a_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \sin \frac{ny}{R} + b_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \cos \frac{ny}{R} + c_{mn} \cdot \cos \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \sin \frac{ny}{R} + d_{mn} \cdot \cos \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \cos \frac{ny}{R} \right). \quad (5.37)$$

З урахуванням крайових умов:

$$W_{x=0} = W_1; \quad W_{x=\Delta L} = W_2;$$

$$\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \Big|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \Big|_{x=\Delta L} = 0$$

останні два члени у розкладанні (5.37) перетворюються на нуль.

Тоді:

$$W = \sum_{m,n} \left(a_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \sin \frac{ny}{R} + b_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \cos \frac{ny}{R} \right). \quad (5.38)$$

Підставляючи (5.38) у (5.36), отримаємо:

$$\sum_{m,n} (p) \cdot \left(a_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \sin \frac{ny}{R} + b_{mn} \cdot \sin \frac{2\pi mx}{\Delta L} \cdot \cos \frac{ny}{R} \right) = 0,$$

де:

$$\varphi_{mn}(p) = \frac{D}{8} \cdot \left(\frac{4\pi^2 m^2}{\Delta L^2} + \frac{n^2}{R^2} \right)^4 + \frac{E}{R^2} \left(\frac{2\pi m}{\Delta L} \right)^4 - p \left(\frac{4\pi^2 m^2}{\Delta L^2} + \frac{n^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{2\pi m}{\Delta L} \right)^2. \quad (5.39)$$

Оскільки ряд сходиться рівномірно та його сума дорівнює нулю тотожно по X і Y , всі коефіцієнти ряду мають дорівнювати нулю [8]. Тому, якщо $W \neq 0$ і, отже, серед коефіцієнтів a_{mn} b_{mn} є відмінні від нуля, то хоча б для однієї пари

цілих m, n має бути $\varphi_{\min}(p)=0$. Зворотно, якщо знайдуться такі m і n те $\varphi_{\min}(p)=0$, що рівняння має нетривіальне рішення [8].

Визначимо найменше значення p , у якому можлива втрата стійкості оболонки, тобто. верхнє критичне навантаження. Таке p визначається як найменше серед значень, що задовольняють $\varphi_{\min}(p)=0$ при цілочисленних m і n .

Припустимо:

$$\xi = \frac{\Delta L n}{2\pi R m}, \quad \eta = \frac{n^2 \delta}{R}, \quad p = \tilde{p} E \frac{\delta}{R}. \quad (5.40)$$

У нових змінних співвідношення $\varphi_{\min}(p)=0$, вирішене щодо \tilde{p} , набуде вигляду:

$$\tilde{p} = \frac{1}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \frac{(1 + \xi^2)^2 \eta}{\xi^2} + \frac{\xi^2}{(1 + \xi^2)^2 \eta}, \quad (5.41)$$

звідси після інтегрування та обчислення мінімуму [30] отримаємо:

$$\min \tilde{p} = \frac{1}{\sqrt{3(1 - \mu^2)}}. \quad (5.42)$$

При $\mu_c = 0,3$ отримаємо $\min \tilde{p} \cong 0,6$.

Підставивши (5.30) у (5.28), отримаємо:

$$p = 0,6 \frac{\delta}{R} E. \quad (5.43)$$

Співвідношення (5.43) дозволяє оцінювати значення навантаження, коли настає втрата стійкості оболонки. Наприклад, для гороху $\delta = 0,12$ мм, $R = 3$ мм та $E = 1,13 \cdot 10^9$ Па отримаємо $p = 0,27 \cdot 10^8$ Па. Модуль пружності оболонки приймаємо рівним модулю пружності ядра, так як тангенс кута нахилу кривої навантаження гороху на початку практично дорівнює тангенсу кута нахилу всієї

кривої навантаження (рис. 5.14).

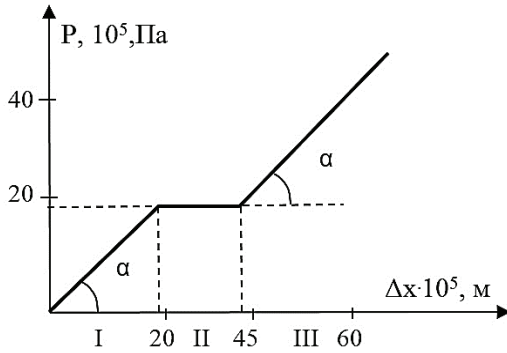


Рис. 5.14. Крива навантаження зерна гороху: I – зона навантаження оболонки, II – зона втрати стійкості оболонки, III – зона навантаження ядра

Обчислимо прогин та енергію деформації при втраті оболонкою стійкості (рис. 5.15).

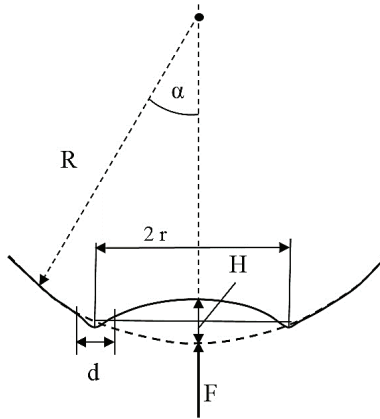


Рис. 5.15. Прогин оболонки під дією сили F

Для пшениці з параметрами $\delta = 0,07$ мм, $R = 1$ мм і $E = 0,23 \cdot 10^9$ Па значення критичного навантаження складе $p = 0,18 \cdot 10^8$ Па.

У [31] наведені співвідношення для пружної енергії деформації оболонки, близької до сферичної, і відповідного прогину:

$$W_o = 1,2 \cdot (1 - \sigma^2)^{\frac{3}{4}} \cdot E \cdot \delta^{\frac{5}{2}} \cdot \frac{H^{\frac{3}{2}}}{R}, \quad (5.44)$$

$$H = \frac{FR}{E\delta^2}, \quad (5.45)$$

де: W_o – енергія пружної деформації, Дж;

E – модуль розтягування, Па;

H – прогин, м;

δ – товщина оболонки, м;

R – радіус кривизни оболонки в зоні застосування навантаження, м.

З урахуванням (5.31) та $d = \sqrt{\delta R}$,

де d – ширина області вигину, м;

з (5.45) після відповідних перетворень отримаємо:

$$H = 0,36 \frac{\pi^2}{\delta^3} (2R\sqrt{\delta R} - \delta R)^2$$

і відповідно

$$\begin{aligned}
W_{\phi} &= \frac{1}{2}(1-\sigma^2)^{-\frac{3}{4}} E \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{R} \left[0,36 \frac{\pi^2}{\delta^3} (2R\sqrt{\delta \cdot R} - \delta \cdot R)^2 \right] = \\
&= \frac{1}{2}(1-\sigma^2)^{-\frac{3}{4}} E \frac{\delta^{\frac{5}{2}}}{R} \left(0,36^{\frac{3}{2}} \right) \pi^3 \delta^{\frac{-9}{2}} (2R\sqrt{\delta \cdot R} - \delta \cdot R)^3 = \\
&= 0,11(1-\sigma^2)^{-\frac{3}{4}} E \frac{1}{R\delta^2} \pi^3 (2R\sqrt{\delta \cdot R} - \delta \cdot R)^3 = \\
&= 0,11 \frac{(1-\sigma^2)^{-\frac{3}{4}} E \pi^3 (2R\sqrt{\delta \cdot R} - \delta \cdot R)^3}{R\delta^2} = \\
&= 0,11 E \pi^3 (1-\sigma^2)^{-\frac{3}{4}} \left(8R^{\frac{7}{2}} \delta^{\frac{-1}{2}} - 12R^3 + 6R^{\frac{5}{2}} \delta^{\frac{1}{2}} - R^2 \delta \right).
\end{aligned} \tag{5.46}$$

Для пшениці $\delta = 0,07 \text{ мм} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

$$R = 1 R \text{ мм} = 10^{-3} \text{ м},$$

будемо мати: $H = 18 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

$$W = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ Дж.}$$

Таким чином, знаючи потенційну енергію стиснення оболонки при ударі частки про перешкоду, із загального балансу енергій [32] можна шляхом віднімання значення обчислити енергію W_{ϕ} віддачі (друга фаза удару) при відображенні частки, що, зрештою, призведе до уточнення обчислень коефіцієнта відновлення швидкості при ударі. Зокрема, для гороху зменшення коефіцієнта відновлення становить $\Delta R_y = 0,09 R_y = 9\%$, а пшениці $\Delta R_y = 0,12 R_y = 12\%$.

Оцінимо вплив уточненого коефіцієнта відновлення на якість сепарації на вібраційному сепараторі з неперфорованою декою в режимі підкидання (одноударний режим). Відповідно до [33, 34], параметр сепарації:

$$\mu_{R,\lambda} = \frac{1-R_y}{1+R_y} \cdot \frac{\lambda}{2-\lambda}, \text{ після підстановки чисельних значень знижується на } 16\%$$

пшениці, і на 12% гороху. Отже, урахування впливу слабоскріпленої оболонки дозволяє уточнити розрахункові параметри під час проектування сепараторів, і навіть на дослідницьких етапах проектування.

5.5. РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНИХ СЕПАРАТОРІВ

Для поділу зернових сумішей за пружними властивостями промисловістю випускається лише одна машина, так звана паддімашина. Хорольський машинобудівний завод виготовив кілька таких сепараторів. Широкого поширення, однак, ці машини не набули через складність конструкції, недостатньо високої питомої продуктивності, великої метало- та енергоємності та низки інших причин. Спроби розробити пристрої, крім падді-машин, що розділяють зернові суміші за пружними властивостями, винахідниками робилися та представлені у роботах [35 – 37]. Однак пристрій, описаний у [35], не знайшов застосування через невисоку якість сепарації, а сепаратори, описані в [36, 37], не знайшли поширення через складність конструкції.

Найбільш простим за конструкцією і не вимагають енерговитрат (за винятком підйому насіння на певну висоту) є ударний сепаратор – похила площина, яку ударяються насіння при падінні і відскакують, при цьому залежно від пружності на певну величину.

Основним недоліком такого пристрою є те, що частинки суміші поділяються, зазнавши одноразового удару похилу площину. При одноразовому ударі частинок не кулястої форми (все насіння є такими) про похилу площину, траєкторії польоту насіння після удару багато в чому залежатимуть від положень частинки щодо площини в момент удару, і з цієї причини насіння з різними пружними властивостями може потрапляти в один і той ж приймач, тобто якість поділу суміші при одноразовому ударі буде недостатньою. Якщо ж частка буде кілька разів стикатися з площиною, то за рахунок опосередкування поверхні частинки точок контакту з площиною при ударах, на результат сепарації вплине

середнє значення коефіцієнта відновлення швидкості, що істотно підвищить якість.

Для оцінки параметрів поділу по пружності були проведені експерименти визначення коефіцієнта відновлення швидкості при ударі гороху об поверхню фанери (рис. 5.16). Випробування піддавалися 100 зерен при п'ятикратній повторності. Середньоквадратична похибка склала 5%.

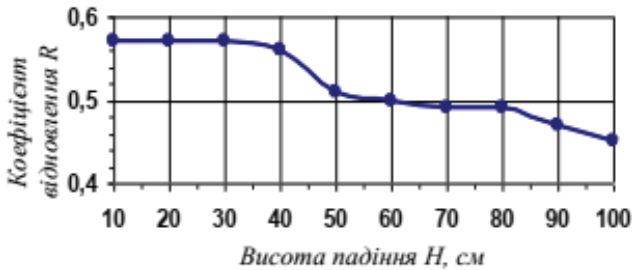


Рис. 5.16. Залежність коефіцієнта відновлення швидкості при ударі від висоти падіння частки

На рис. 5.16 показано, що при висоті падіння 10 см коефіцієнт відновлення проявляється повністю і може бути використаний як ознака подільності як при однократному так і при багаторазовому ударі. З конструктивних міркувань відстань між живильним бункером і поверхнею, що сепарує для сепараторів з однократним ударом, повинна бути більше цього значення в декілька разів.

Поліпшити якість роботи ударних сепараторів можна шляхом використання багаторазового удару насіння про відбивні сепаруючі поверхні [38]. Багаторазові зіткнення насіння з відбивальними поверхнями дозволяють як би опосередкувати їх пружні властивості і тим самим точніше розділити суміш за пружними властивостями, окрім цього висота скидання насіння на ударну поверхню може бути значно зменшена і травмованість зерна при сепарації практично зведена до нуля.

Розглянемо пружні відбиття частки від похилої деки протягом кількох ударів, випробуваних нею на похилій площині. Для спрощення виразів прийемо удар абсолютно пружного тіла з коефіцієнтом відновлення швидкості $R_y = 1$. Схема руху частки представлена рис. 5.17.

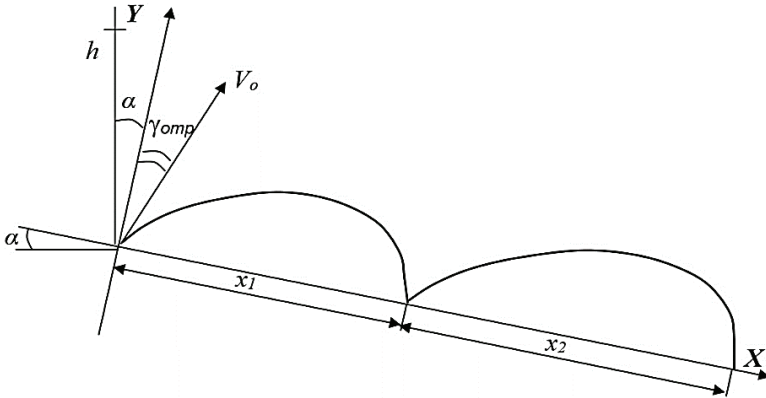


Рис. 5.17. Схема зіткнень частинки з похилою площиною

Швидкість частки на момент першого удару дорівнює $V_0 = \sqrt{2gh}$, де h – висота падіння. Початкова швидкість частинки після відбиття від площини має те ж значення, але інший напрямок, симетричний щодо осі Y . Проекції початкової швидкості:

$$V_{0y} = V_0 \cos \alpha; V_{0x} = V_0 \sin \alpha.$$

Рівняння руху частинки у проєкціях на осі:

$$V_x = V_{0x} + a_x t; V_y = V_{0y} + a_y t;$$

$$X = V_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}; Y = V_{0y} t + \frac{a_y t^2}{2},$$

де: $a_x = g \sin \alpha$; $a_y = -g \cos \alpha$;

$$V_x = V_0 \sin \alpha + gt \sin \alpha;$$

$$V_y = V_0 \cos \alpha - gt \cos \alpha.$$

Час τ_1 між першим і другим ударами знайдемо з умови $y = 0$:

$$V_{0y} + \frac{a_y t_1}{2} = V_0 \cos \alpha - \frac{gt_1 \cos \alpha}{2} = 0;$$

$$t_1 = \frac{2V_0}{g} = \frac{2\sqrt{2gh}}{g}.$$

Підставляємо це значення в рівняння руху по осі x :

$$x_1 = V_0 \sin \alpha \frac{2V_0}{g} + \frac{g \sin \alpha}{2} \cdot \frac{2V_0^2}{g^2} = \frac{4V_0^2}{g} \sin \alpha = 8h \sin \alpha. \quad (5.47)$$

Проекції швидкості на момент другого удару:

$$V_x = V_0 \sin \alpha + g \sin \alpha \frac{2V_0}{g} = 3V_0 \sin \alpha;$$

$$V_y = V_0 \cos \alpha - g \cos \alpha \frac{2V_0}{g} = \pm V_0 \cos \alpha.$$

Знак «-» відповідає моменту падіння, знак «+» – моменту відбиття, тобто.

V_y змінює лише знак.

У момент n удару проекції швидкості після відбиття будуть рівні:

$$V_x = (2n-1)V_0 \sin \alpha;$$

$$V_y = V_0 c \cos \alpha .$$

Таким чином, по осі x проекція швидкості постійно зростає, а по осі Y – залишається постійною (за умови $R_y = 1$).

Проміжки часу між ударами не залежать від жодних змінних величин і тому однакові для всіх положень.

Знайдемо відстань x_2 між точками другого та третього ударів:

$$x^2 = 3V_0 \sin \alpha \frac{2V_0}{g} + g \sin \alpha \left(\frac{2V_0}{g} \right) = 16hs \sin \alpha . \quad (5.48)$$

Продовжуючи таким самим шляхом обчислення, знайдемо, що відстань між точками n -го та $n+1$ -го ударів дорівнює:

$$x_n = 8nh \sin \alpha .$$

Для реальних частинок $R \neq 1$, саме: $R < 1$. Враховуючи, що $h = \frac{V_0^2}{2g}$, а швидкість після удару $V = R_y V_0$ отримаємо:

$$x_n = 4n \frac{R_y^2 V_0^2}{g} \sin \alpha . \quad (5.49)$$

У табл. 5.3 показані результати розрахунків дальностей польоту частинок з різними характеристиками насіння ($R_y = 0,1 \dots 0,4$) при різних початкових швидкостях падіння ($V_0 = 1; 2; 3 \text{ м/с}$) та різних кутах нахилу площин відбиття.

Відстань між відскоками ($n=5$)

$R_y \backslash n$	1	2	3	4	5
0,2	0,011	0,021	0,032	0,042	0,053
0,3	0,024	0,048	0,072	0,096	0,119
0,4	0,042	0,085	0,127	0,17	0,212

На рис. 5.18 та 5.19 наведено результати розрахунків при різних R_y та початковій швидкості $V_0 = 2$ м/с.

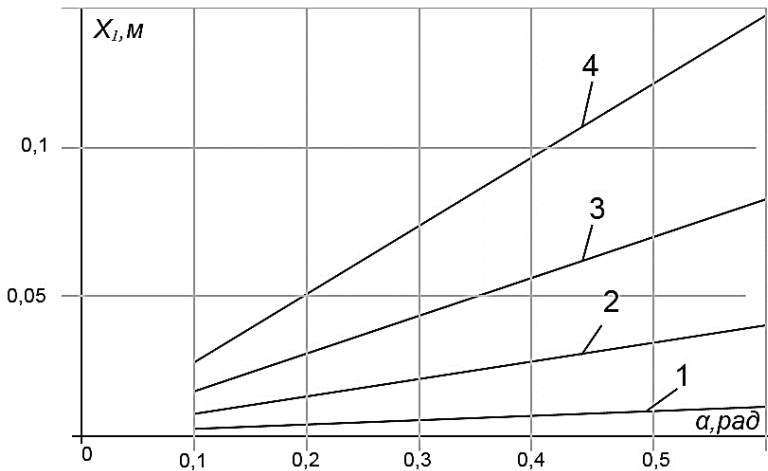


Рис. 5.18. Дальність польоту частки після першого удару: $V_0 = 2$ м/с;
 1 — $R_y = 0,1$; 2 — $R_y = 0,2$; 3 — $R_y = 0,3$; 4 — $R_y = 0,4$

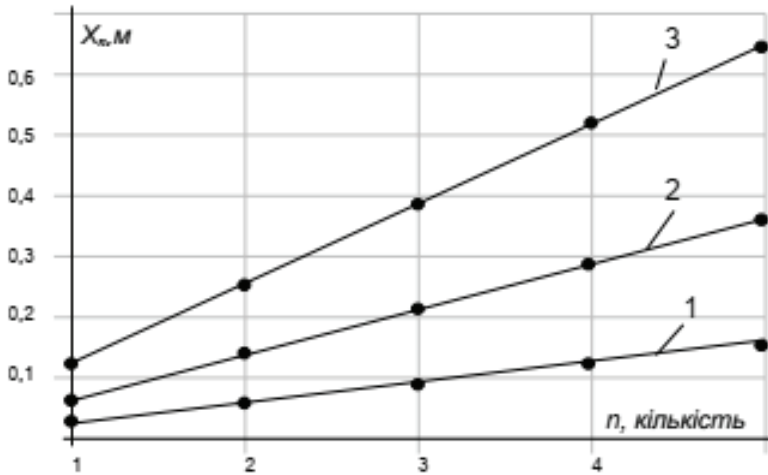


Рис. 5.19. Дальність польоту частки у процесі п'яти відскоків: 1 – $R_y = 0,2$; 2 – $R_y = 0,3$; 3 – $R_y = 0,4$; $\alpha = 30^\circ$; $V_0 = 2$ м/с

Результати розрахунків показують, що в діапазоні зміни коефіцієнта відновлення від $R_y = 0,1$ до $R_y = 0,4$ (значення для реальних зерен) найбільш прийнятними (з конструктивної точки зору) є параметри: $V_0 = 2$ м/с, $\alpha = 30^\circ$. Для випадку $V_0 = 3$ м/с розміри похилих площин неприйнятні з конструктивних міркувань. Для режиму з $V_0 = 1$ м/с дальності відскоків можна порівняти з розмірами частинок і тому для сепарації цей режим непридатний. Очевидно, що бур'яни і зерна с $R_y \leq 0,1$ практично ковзатимуть по площині і зійдуть вже з першої деки для режиму сепарації з $V_0 = 2$ м/с, $\alpha = 30^\circ$.

Сепарація сипких сумішей за пружністю на гравітаційних відбивних поверхнях має в порівнянні з іншими способами сепарації на похилих поверхнях, вібросепарація на фрикційних площинах, або поділ у гвинтовому каналі ряд переваг:

- ударна взаємодія насіння із поверхнею проводиться при їхніх рівних швидкостях і при однакових кутах між векторами швидкості і нормаллю до поверхні, що забезпечує рівні умови для всього насіння суміші;

- область зустрічних і пересічних потоків насіння мінімальна, що знижує ймовірність порушення процесу через взаємні зіткнення насіння;

- вільний рух насіння до і після удару дозволяє проводити сепарацію тільки за пружними властивостями, крім фрикційного впливу поверхні, що має істотне значення при очищенні високопружного насіння, що мають близькі фрикційні властивості з деякими видами насіння бур'янистих рослин;

- обладнання для здійснення способу мають просту конструкцію стійкий режим роботи й легко піддаються регулюванню.

Процес сепарації на відбивній поверхні можна умовно розділити на три стадії:

- набуття насінням початкової швидкості до моменту удару;

- косий удар насіння по відбивній поверхні, у результаті якого відбувається зміна швидкості і напрямку їх руху;

- вільний рух насіння до моменту їх поділу на фракції по дальності польоту.

Найбільше поширення набула схема сепарації насіння за пружними властивостями (рис.5.20), у якій швидкість насіння до моменту удару досягається за рахунок падіння їх певної висоти H під дією сили ваги. Відбивна поверхня 1 встановлюється під кутом α до обрію. Цей кут виходячи з максимальної дальності польоту визначено в $22^\circ 30'$ [4]. Тоді кут між напрямком руху насіння до удару й нормаллю до поверхні також дорівнює α . Після удару насіння рухається, без урахування опору повітря, по параболічних траєкторіях. Більш пружне насіння має і більш протяжну траєкторію руху. Відмінності в пружних властивостях насіння проявляються у відмінностях дальності їх польоту L_1 . Чим більше різниця в дальності польоту ΔL_1-L_2 пружного (L_1) і менш пружного (L_2) компонентів, тим вище ефективність їх сепарації. Отже завдання підвищення ефективності очищення

насіння за пружними властивостями зводиться до визначення умов, при яких різниця в дальності польоту насіння та засмічувачів максимальна.

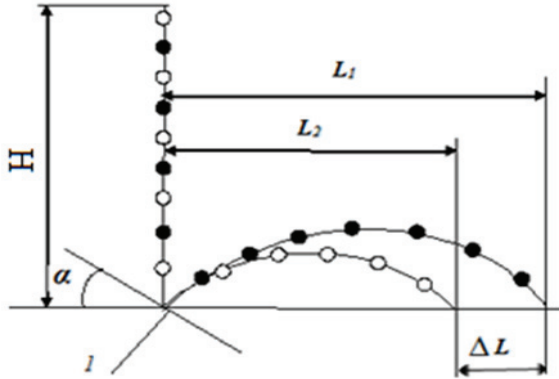


Рис. 5.20. Схема визначення дальності польоту насіння після удару об похилу сталю відбивну поверхню 1 – відбивна поверхня; $\bullet \rightarrow \circ$ – насіннева суміш; $\bullet \rightarrow$ більш пружний компонент; $\circ \rightarrow$ менш пружний компонент

Для експериментальних досліджень були обрані насіння найбільш поширених в Україні культур: пшениця, ячмінь, кукурудза, соняшник, горох, соя, ріпак та просо. Якості ударної поверхні обрані сталь та фанера технічна. Висота скидання H обрана 0,3м. Такою вона установлена з технологічних та конструктивних міркувань, а також з ручного обслуговування в блочно-модульному ударному сепараторі.

Аналіз варіаційних кривих (рис.5.21-5.24) дальності польоту після удару цих культур свідчить про доволі значний розбіг цього показника як на фанері технічній так і на сталі, найбільший він для гороху, при чому зі зміщенням в сторону більших величин на фанері технічній для всіх культур без винятку.

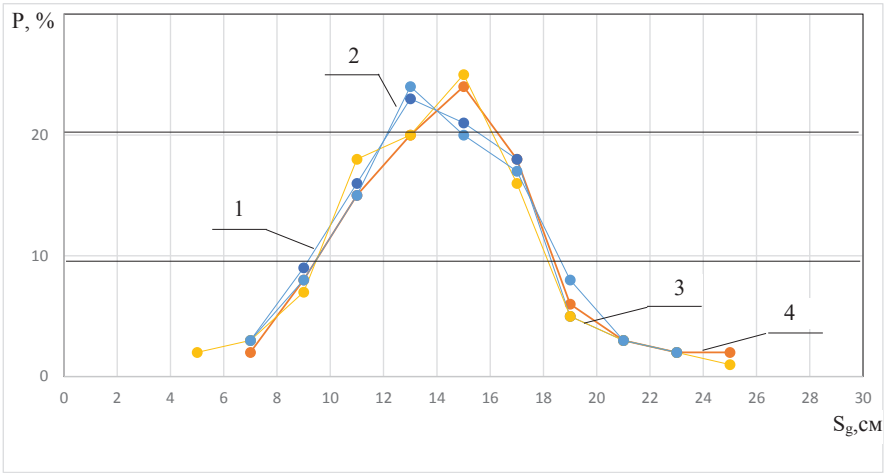


Рис. 5.21. Графіки дальності польоту насіння продовгуватої форми після удару по технічній фанері:

1 – ячмінь; 2 – соняшник; 3 – кукурудза; 4 – пшениця

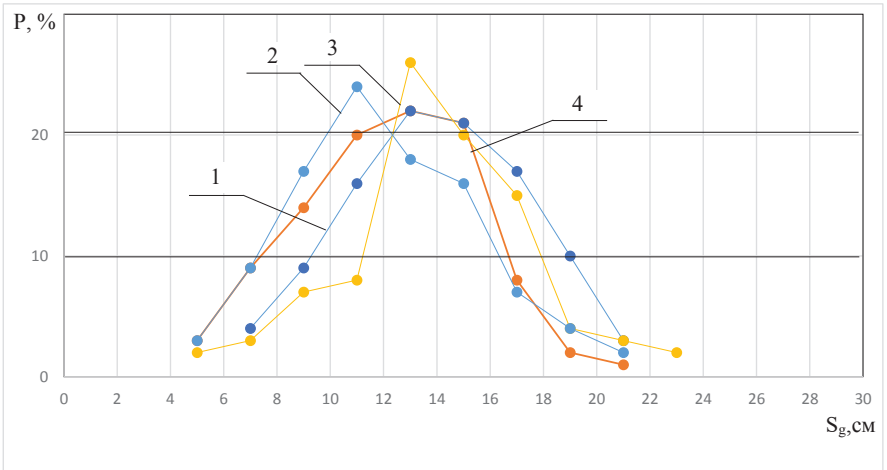


Рис. 5.22. Графіки дальності польоту насіння продовгуватої форми після удару по сталі:

1 – ячмінь; 2 – соняшник; 3 – кукурудза; 4 – пшениця

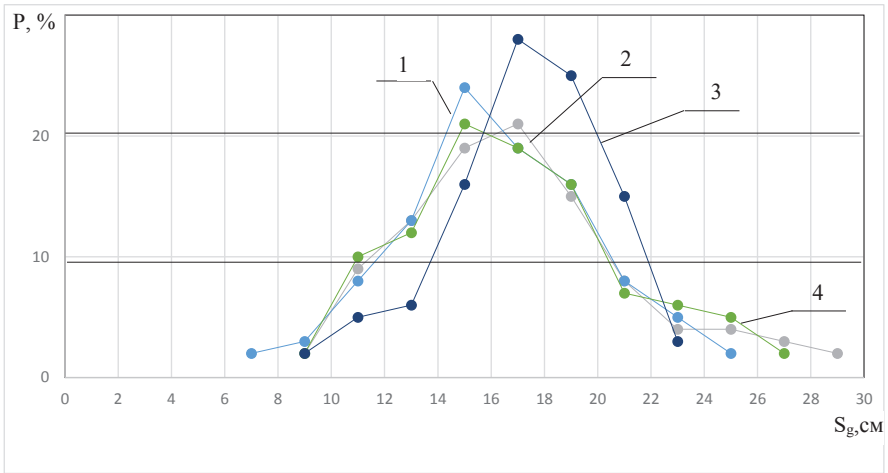


Рис. 5.23. Графіки дальності польоту насіння округлої форми після удару по технічній фанері:

1 – соя; 2 – горох; 3 – просо; 4 – ріпак

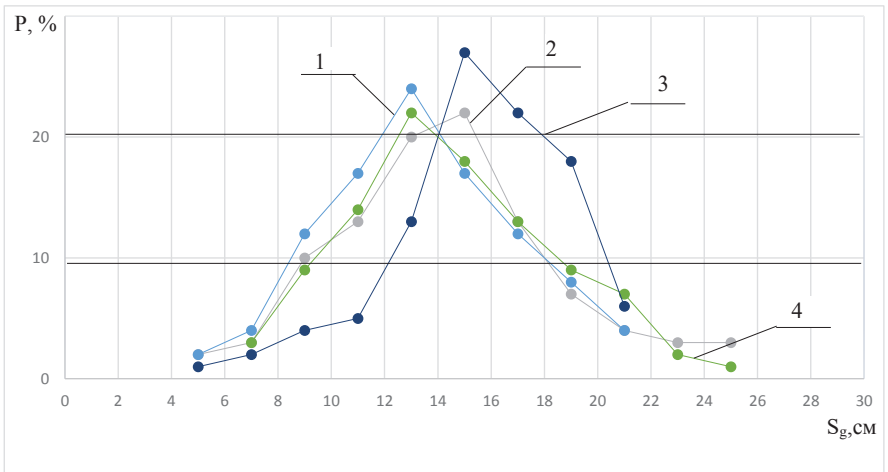


Рис. 5.24. Графіки дальності польоту насіння круглої форми після удару по сталі:

1 – соя; 2 – горох; 3 – просо; 4 – ріпак

Найменша дальність польоту після удару у ячменя по сталі. А взагалі вирисовується тенденція, що більш округлі насіння мають більшу величину польоту насіння після удару у гороха наприклад до 30см і для округлого насіння вона є більш сталою. Дальність польоту для всіх культур є більшою на фанері технічній за рахунок пружних властивостей самої поверхні. Кількість відскоків на фанері, як правило, - 3,4 на сталі- 2,3 відскоки. Ці результати дозволяють зробити висновок про необхідність використання багатократних ударів під час сортування насіння. З цих міркувань, а також з метою спрощення конструкції фанеру технічну можна рекомендувати в якості робочої поверхні багатоярусного ударного сепаратора, що реалізовано в блочно модульному гравітаційному ударному сепараторі.

Використовуючи залежність дальності польоту зерна, після першого удару і загальної кількості не більше чотирьох ударів можна рекомендувати поперечний і поздовжній розміри поверхонь, що сепарують (поперечний – 0,2 м, поздовжній – 1,5 м).

Конструктивна схема багатоярусного ударного сепаратора представлена на рис. 5.25.

Багатоярусний ударний сепаратор складається з живильного бункера 1, похилих з поз довжньо-поперечним нахилом неперфорованих 2 і приймачів продуктів поділу 3.

У цьому сепараторі зернова суміш з живильного бункера послідовно надходить на каскад дек, що відбивають. Деки мають поперечний і поздовжній нахили по відношенню до горизонту, і розташовані так, що зернова суміш, зазнавши удару об одну, стикається з розташованою поруч. Чим вище пружність зерна, тим більше ударів воно відчуває у проміжку між рядом розташованими деками, отже, і більшу відстань вздовж поздовжньої осі переміститься від місця подачі. Зійшовши з верхніх дек, зерно під впливом сили тяжіння знову набирає необхідну швидкість і вдаряється об деку, розташовану нижче, але зі зміщенням від місця подачі на відстань, пропорційне, зрештою, пружності зерна. Далі процес

повторюється у другому ярусі, а потім і в усіх інших, нижчерозташованих парах дек (ярусах).

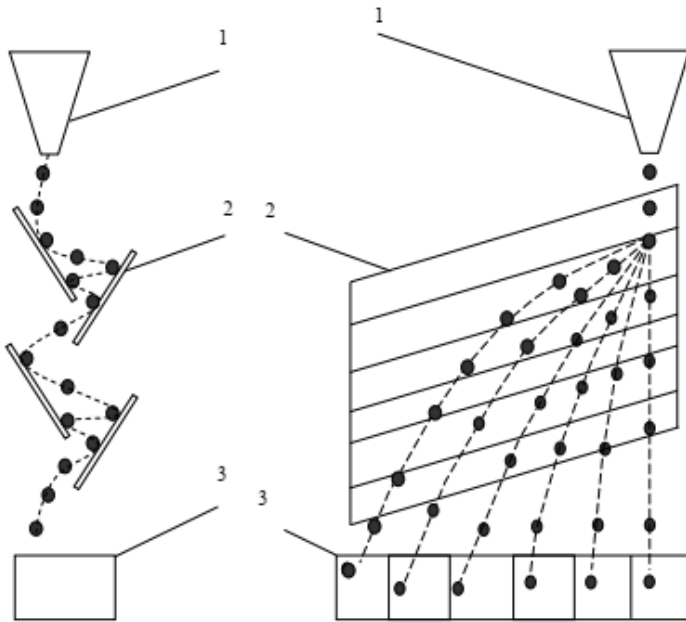


Рис. 5.25. Схема багатоярусного ударного сепаратора: 1 – бункер; 2 – деки; 3 – приймачів продуктів поділу

У нижній частині пристрою розташовані приймальні ємності, і найбільш пружні зерна, зрештою, потраплять у найдавший від пристрою живлення приймач. Відповідно подрібнені, щуплі і найменш пружні будуть у ближніх від живильника приймачах. Загальний вигляд багатоярусного ударного сепаратора представлено на рис. 5.26.



Рис. 5.26. Загальний вигляд модуля багатоярусного ударного сепаратора

Як об'єкти дослідження використовувалися: пшениця, ячмінь, кукурудза, горох, просо, ріпак, соняшник та соя. Експериментальні дослідження проведено у науково-дослідній лабораторії кафедри "Обладнання та переробних і харчових виробництв". Попередньо насіння кожної культури було очищене на пневмо-решітних очисних машинах. Очищене зерно та насіння від мінеральних домішок пройшли обробку на гравітаційному ударному сепараторі та були розділені на 5 фракцій. Після сепарації кожної культури було відібрано зразки у трьох повтореннях з кожного лотка та зважено на лабораторних вагах. Результати вимірювань середнього значення маси зерна з кожного лотка наведено у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4.

№ п/п	Найменування культури	Номер приймального лотка				
		№1	№2	№3	№4	№5
		Середня маса 1000 зерен				
1	Пшениця	42,3	43,4	45,5	47,2	48,8
2	Ячмінь	45,5	45,8	46,2	46,9	47,3
3	Горох	242,9	243,1	243,0	245,3	246,2
4	Просо	0,7	0,74	0,7	0,76	0,76
5	Ріпак	3,9	3,9	4,0	4,24	4,37
6	Соняшник	110,21	112,5	115,2	118,1	119,6
7	Соя	160,23	168,4	174,2	175,4	180,2
8	Кукурудза	284,3	286,8	291,0	298,3	301,8

Як видно з таблиці, значення середньої маси відібраних зерен кожної культури зростає від першого лотка до п'ятого. Значить, можна припустити, що вміст 3, 4, 5 лотків містять зерна найбільш підходящі для сівби.

Для визначення параметрів процесу сепарування зерна на гравітаційному ударному сепараторі було проведено виборчі досліді щодо сепарації насіння визначених культур.

На рис 5.27, та рис 5.28 приведені залежності розміру маси насіння в лотках сепаратора для круглої та подовженої форми при поперечному куті 35° для обох випадків та поздовжньому куті 4° для насіння круглої форми та 7° для насіння подовженої форми. Поперечний кут для попередніх дослідів обрано постійним 35° з точки зору скочування домішок з робочої поверхні. Подача теж прийнята постійною – 50 кг/год.

Як видно з рисунків 5.27 та 5.28 розподіл насіння круглої форми носить більш пологий характер і в 4 та 5 лотки поступає більше пружного насіння. Графіки розподілу насіння подовженої форми мають більш виражений екстремум з найбільшою масою для всіх видів у третьому лотку, окрім кукурудзи – в четвертому лотку.

Тобто оскільки середня маса 1000 зерен найбільш зростає в 4 та 5 лотках можна вважати, що кращих результатів сортування насіння на багатоярусному ударному сепараторі слід очікувати для насіння круглих форм.

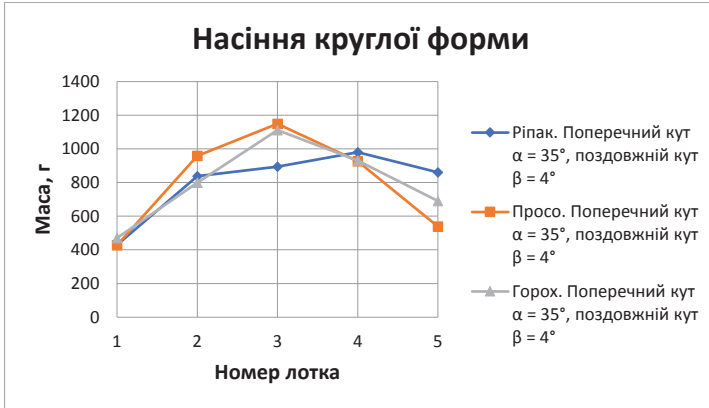


Рис. 5.27 Залежність розподілу маси насіння круглої форми в лотках сепаратора.

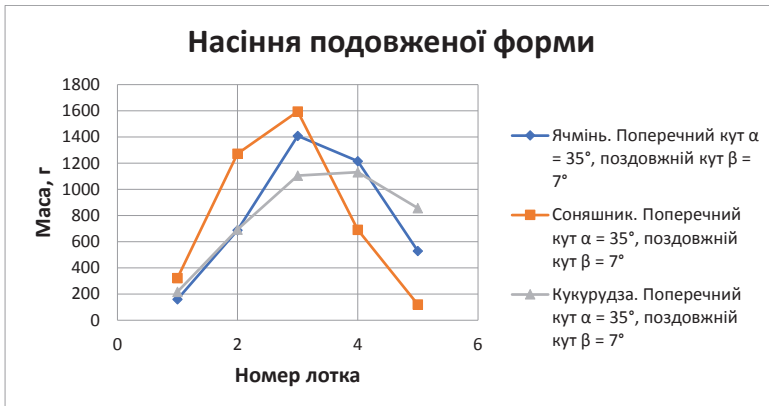


Рис. 5.28. Залежність розподілу маси насіння подовжній форми в лотках сепаратора.

Для насіння круглої форми максимальне значення маси в лотку №3 досягається при поздовжніх кутах менших ніж для насіння поздовжній форми.

Як приклад на рис. 5.29 наведено фотографії сепарації соняшнику. У лотках №1 та №2 добре видно домішки та насіння соняшнику не придатне до сівби. Вміст лотків №3, №4 та №5 містить здорове насіння соняшника з мінімальним вмістом домішок. Таке насіння можна рекомендувати до посіву.

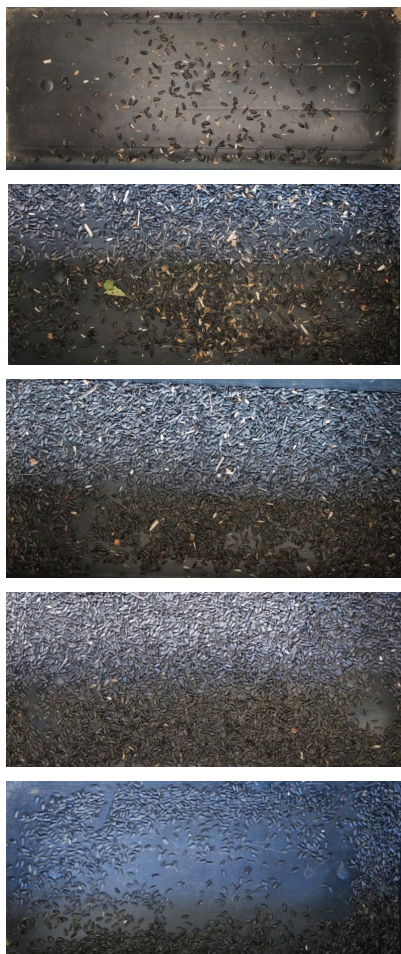


Рис.5.29. Результат сепарування насіння соняшника.

Зверху вниз від лотка №1 до лотка №5

Пошук оптимальних значень позовжнього кута проведено для насіння пшениці. Серія однофакторних експериментів дозволила визначити параметри оптимізації факторів, що досліджуються. Для визначення значень факторів були проведені однофакторні експерименти, результати яких наведено на рис.5.30 - 5.33.



Рис. 5.30 Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=45^\circ$, позовжній кут $\beta=7^\circ$

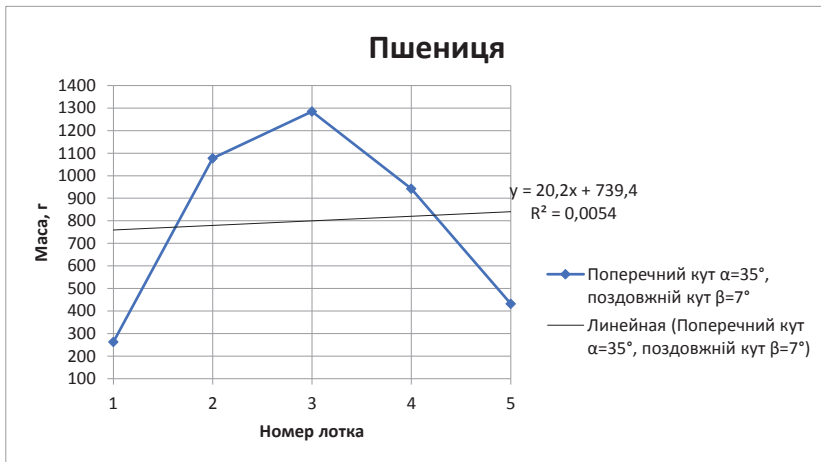


Рис. 5. 31. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.
 Поперечний кут $\alpha=35^\circ$, позовжній кут $\beta=7^\circ$

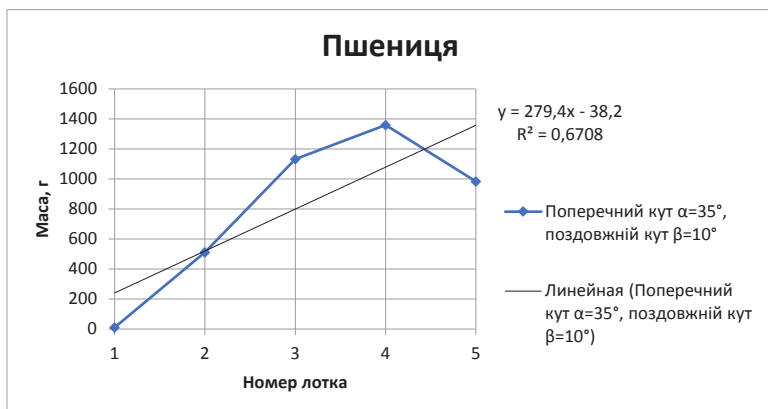


Рис. 5.32. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.

Поперечний кут $\alpha=35^\circ$, поздовжній кут $\beta=10^\circ$

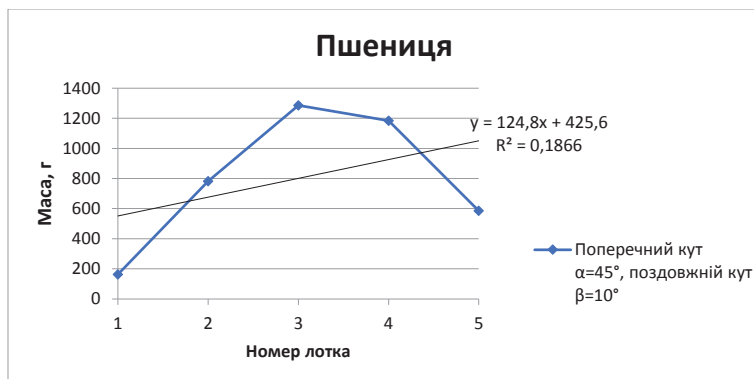


Рис. 5.33. Розподіл по масі у приймальних ємностях після сепарації.

Поперечний кут $\alpha=45^\circ$, поздовжній кут $\beta=10^\circ$

Для проведення експериментів був обраний тривірневий некомпозіційний план Боксу-Бенкіна 2-го порядку (3,4). Для визначення факторів, які найбільше впливають на критерій оптимізації, застосований метод апіорного ранжирування [43]. В результаті виділено три основні фактори що варіюють: x_1 – поздовжній кут α , град.; x_2 – поперечний кут β , град. подача зерна Q , кг/рік. Верхній та нижній рівні факторів були призначені за результатами теоретичних

досліджень та конструктивних міркувань. Як параметр оптимізації були обрані маси насіння в лотках №3 і №4. У таблиці 5.5 наведені значення факторів і інтервали варіювання факторів.

Таблиця 5.5

Значення факторів і інтервали варіювання факторів

Фактор	Позначення		Рівні варіювання фактора			Інтервал варіювання
	Найменування	Натуральне	кодове	+1	0	
Поперечний кут α , град.	X_1	x_1	40	35	30	5
Поздовжній кут β , град.	X_2	x_2	9	6	3	3
Подача зерна, Q , кг/час.	X_3	x_3	70	60	50	10

В ході планування експериментальних досліджень задаємося нижченаведеними параметрами: надійність результату дослідження – 0,95; допустима похибка – $\varepsilon = \pm \sigma$, число повторності дослідів – 3. Для усунення помилок використовували критерій Стьюдента.

Після проведення експерименту відповідно до матриці планування проведена статистична обробка отриманих результатів. Після підстановки коефіцієнтів регресії для кожної функції оптимізації отримаємо наступні рівняння:

$$y_1 = 21,6 + 0,45x_1 - 0,13x_2 + 0,1x_3 + 0,46x_1x_2 + 0,54x_2x_3 + 2,22x_1x_3 - 2,49x_1^2 - 0,74x_2^2 - 2,08x_3^2;$$

$$y_2 = 21,6 + 0,15x_1 - 0,04x_2 - 0,1x_3 + 0,23x_1x_2 + 0,11x_2x_3 + 1,29x_1x_3 - 1,92x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,67x_3^2;$$

Порівнюючи отримані значення, ts_{b_i} з коефіцієнтами рівняння регресії, отримали наступні рівняння регресій:

$$y_1 = 21,6 + 0,45x_1 + 0,46x_1x_2 + 0,54x_2x_3 + 2,22x_1x_3 - 2,49x_1^2 - 0,74x_2^2 - 2,08x_3^2; \quad (5.50)$$

$$y_2 = 21,6 + 0,15x_1 - 0,1x_3 + 0,23x_1x_2 + 0,11x_2x_3 + 1,29x_1x_3 - 1,92x_1^2 - 0,4x_2^2 - 1,67x_3^2; \quad (5.51)$$

Використовуючи дані розрахунку з табл. 3 побудували двовимірні перерізи поверхонь відгуку: маса насіння в лотку №3 і маса насіння в лотку №4.

Перевірку адекватності рівнянь проводили шляхом порівняння дисперсій адекватності з дисперсією параметра оптимізації за критерієм Фішера (5.20, 5.21). В результаті отриманих розрахунків $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$. Отже рівняння (5.20) и (5.21) адекватні (табл. 5.6).

Таблиця 5.6

Результати статистичної обробки рівнянь регресій

№ п/п	Позначення	Маса в лотку №3	Маса в лотку №4
1	S_y^2	0,0641	0,0012
2	S	0,2534	0,0345
3	$S_{\text{ад}}^2$	0,055	0,0014
4	$F_{\text{расч.}}$	0,857	1,2
5	$F_{\text{табл.}}$	2,12	2,12
6	$G_{\text{расч.}}$	0,2241	0,2371
7	$G_{\text{табл.}}$	0,3346	0,3346

Результати канонічних перетворень рівнянь регресій для двомірних перетинів представлені в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Результати канонічних перетворень рівнянь регресій
для двомірних перетинів поверхонь відгуків

	Параметри оптимізації	Невідомі рівняння	Коефіцієнти рівняння		Координати нового центру, S			Знач. параметра опт. в точці S	Значення факторів в центрі S			Кут пов. осей в центрі S $\varphi, ^\circ$
			B_1	B_2	x_{s1}	x_{s2}	x_{s3}		α , град.	β , град.	Q , кг/год.	
1	Маса в лотку №3, г	$x_1=0$	-0,91	-1,9		0,00	0,00	21,63		6	60	-10
		$x_2=0$	-1,96	-2,35	-0,19		0,05	21,45	34,04		60,5	21
		$x_3=0$	-2,4	-0,8	-0,2	0,13		21,41	33,98	6,38		22
2	Маса в лотку №4, г.	$x_1=0$	-0,37	-1,68		-0,12	0,04	14,9		5,63	60,4	13
		$x_2=0$	-1,7	-1,88	-0,08		-0,05	14,9	34,62		59,5	21
		$x_3=0$	-0,5	-1,79	-0,08	0,05		14,89	34,58	6,15		21

Для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів сепаратора

побудовано двомірні перерізи поверхонь відгуків (рис. 5.34-5.36).

$Q, \text{ кг/год.}$

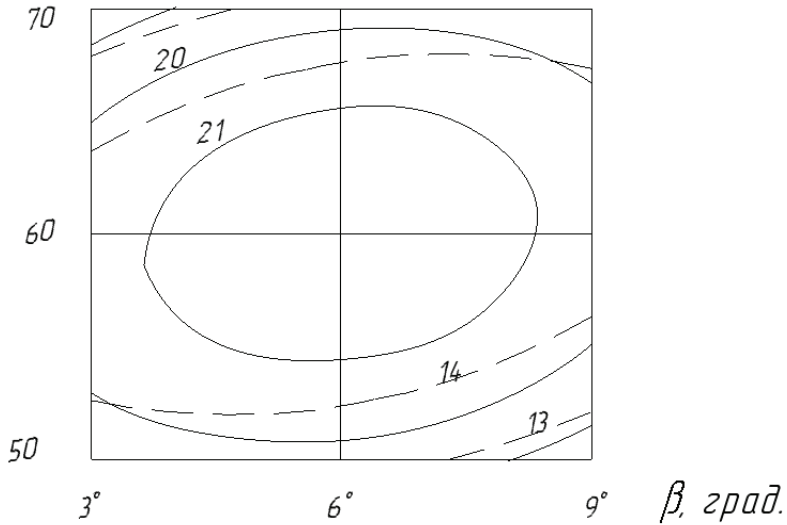


Рис. 5.34. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_1 = 0$), що характеризують вплив поздовжнього кута β (фактор x_2) та подачі зерна Q кг/год. (фактор x_3) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна лінія).

З рис. 5.34 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні поздовжнього кута $\beta=6^\circ$ і подачі зерна $Q=60$ кг/рік. На підставі цього рисунку можна стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: поздовжній кут від 4° до 8° і подача зерна Q від 55 до 65 кг/год.

$Q, \text{ кг/год.}$

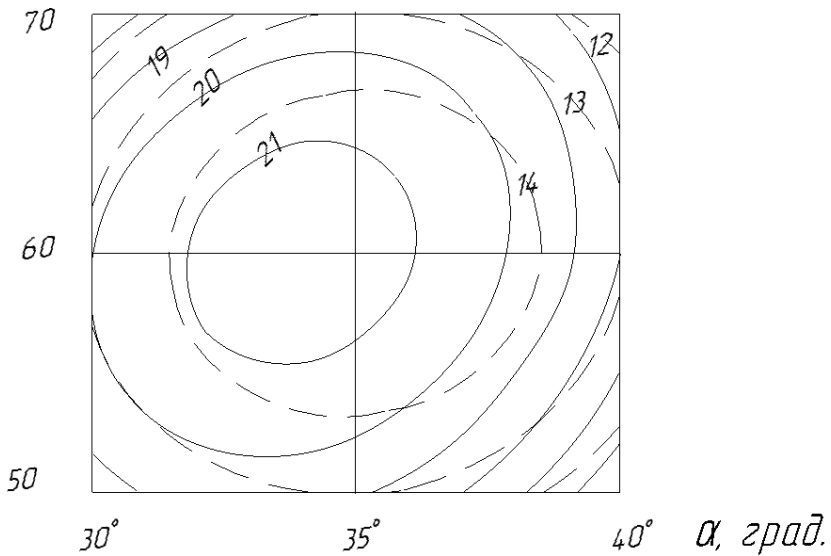


Рис. 5.35. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_2 = 0$), що характеризують вплив поперечного кута α (фактор x_1) та подачі зерна Q кг/год. (фактор x_3) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна лінія).

З рис. 5.35 видно, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 та лотку №4 має місце при значенні поперечного кута $\alpha \beta = 34^\circ$ та подачі зерна $Q = 60$ кг/год. На підставі цього рисунка можна також стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: поперечного кута α від 32° до 37° і подача зерна Q від 55 до 64 кг/год.

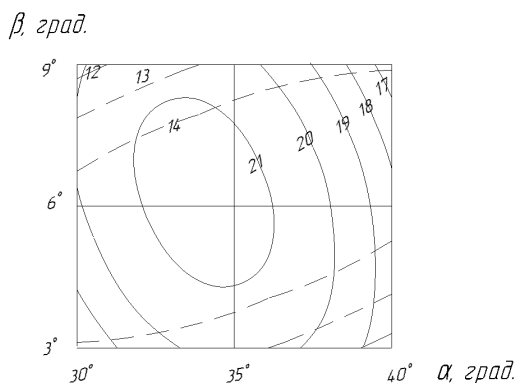


Рис. 5.36. Двомірні перерізи поверхонь відгуку ($x_3 = 0$), що характеризують вплив поперечного кута α (фактор x_1) та поздовжнього кута β (фактор x_2) на масу зерна у лотку №3 (суцільна лінія) та масу зерна у лотку №4 (пунктирна) лінія).

З рис. 5.36 бачимо, що максимальне значення маси зерна в лотку №3 і лотку №4 має місце при значенні поперечний кута $\beta=34^\circ$. і поздовжній кут $\beta = 7^\circ$ подачі зерна $Q=60$ кг/ год. На підставі цього рисунка можна також стверджувати, що допустимі значення аналізованих факторів (при допустимому значенні маси №3 і маси №4) можуть бути в межах: кут від 32° до 36° поздовжній кут.

З аналізу графіків можна визначити оптимальні значення чинників: поперечний кут $\alpha = 34^\circ$, поздовжній кут $\beta = 6^\circ$ і подача зерна $Q = 60$ кг/год.

На процес сепарації багатоярусному ударному сепараторі енергія не витрачається, т.я. частинки у процесі сепарації переміщуються лише під дією сили тяжіння.

Витрати енергії в багатоярусному ударному сепараторі можливі тільки підйом сипучої суміші в бункер, але необхідні всім сепараторів. Відсутність підведення енергії на процес сепарації дозволяє використовувати його в невеликих господарствах для сепарації зерна прямо на полі відразу після збирання з подачею зерна в бункер вручну або за допомогою найпростіших пристроїв.

Висновки до розділу до розділу 5

1. Для визначення пружних характеристик зерна на різних підкладках (моделюючих матеріал деки) створена експериментальна установка, що дозволяє знімати криву навантаження – розвантаження з урахуванням форми зернівки та її положення щодо підкладки. Точність визначення деформації становить $0,5 \cdot 10^{-6}$ м, вимірювання зусиль – 0,1 Н.

2. В результаті експериментальних досліджень на цій установці було отримано значення модуля пружності для різних зерен. Так, для гороху вологістю 10% модуль Юнга становить $E = 1,13 \cdot 10^9$ Па, для вологості 14% – $E = 0,92 \cdot 10^9$ Па, а для пшениці з вологістю 12% – $E = 0,23 \cdot 10^9$ Па. Коефіцієнт Пуассона всім зерен становить $\sigma = 0,45$, внаслідок їх аморфної структури.

3. Запропоновано спосіб визначення коефіцієнта відновлення швидкості при ударі за результатами випробувань щодо визначення пружних властивостей зерна з урахуванням гістерезису. Цей спосіб дозволяє визначати вищезгаданий параметр одночасно з випробуваннями на пружність.

4. Для використання в теоретичних дослідженнях руху частинок з поперечними перерізами зазначених вище форм було визначено положення центру мас, складено рівняння кривої щодо центру мас перерізу (існуючі в літературі рівняння складені щодо початку координат), а також складено формули для обчислення моменту інерції перерізу щодо осі, що проходить через центр мас. Наприклад, для кардіоїди (випадає равлика Паскаля) $I_{zk} = 10,17a_0^4$.

5. Обґрунтовано можливість сепарації зернових сумішей за пружністю залежно від кута відбиття частки від коефіцієнта відновлення швидкості при ударі R_y . Показано, що із збільшенням R_y для дійсних коефіцієнтів миттєвого тертя $\theta_r = 0,3$. Розраховані залежності кута відбиття від кута падіння при різних R_y і θ_r звідки ясно, що кут падіння φ_n слід вибирати в межах від 30° до 60° . Запропоновано кілька важливих схем поділу частинок при ударі, як об

вертикальну, і об похилу площині. Наведений вираз для дальності польоту частки після відображення дозволяє визначити конструктивні параметри. Наприклад, при висоті падіння $h=1$ м; $\theta_r=0,3$; $R_y=0,4$; $\alpha=30^\circ$ дальність польоту $S=0,345$.

6. Показано, що спосіб сепарації сумішей за пружними властивостями є недостатньо вивченим, а уявлення про точковий контакт частинки з декою є спрощеним, що не враховує особливостей форми та деформацій під час удару, часу зіткнення та площі контакту. У зв'язку з цим розроблено методику розрахунку згаданих параметрів з погляду теорії пружності. Розгляд задачі на прикладі удару кулястої частинки дозволяє поширити її на тіла іншої форми. Отримано також вирази для оцінки змінання, розподілу тиску в місці контакту, а також потенційної енергії змінання.

7. На основі теорії оболонок отримані співвідношення, що дозволяють скоригувати значення коефіцієнта відновлення швидкості R_y частинок зерна з урахуванням властивостей оболонки. При деякому значенні напруги P у фазі навантаження оболонка втрачає стійкість (для гороху при $P=0,18 \cdot 10^8$ Па, не обов'язково руйнується), характер фази навантаження набуває злам на графіку, частина енергії витрачається на деформацію самої оболонки. В результаті цього ядро ударяється об перешкоду з меншою енергією і, зрештою, коефіцієнт відновлення швидкості знижується. Наприклад, для гороху зменшення R_y становить 9%, а пшениці – 12%. Внаслідок цього параметр сепарації зменшується відповідно на 12% і 16%.

8. Наведено результати експериментальних досліджень щодо визначення коефіцієнта відновлення швидкості R_y залежно від висоти падіння частки (від її швидкості). Для гороху, наприклад, показано, що з середньоквадратичною похибкою 5% отримані значення R_y змінюються при $R_y=0,57$ висоті падіння від 0,1 м до 0,4 м, від 0,47 при висоті падіння 1 м. Це свідчить про те, що зі

збільшенням швидкості удару зростають втрати кінетичної енергії на деформацію в першій фазі і енергія віддачі зменшується в другій фазі. Наведено також розрахункові співвідношення для обчислення необхідних кінематичних параметрів реального сепаратора. Рекомендована висота падіння 0,3 м.

Показано переваги багаторазового удару перед одноразовим за рахунок опосередкування по поверхні частинки точок контакту з площиною, що істотно підвищує якість сепарації завдяки тому, що останню зумовлюватиме середнє значення коефіцієнта відновлення швидкості. Ця перевага реалізована у зробленому та виготовленому багатоярусному ударному сепараторі.

9. Аналіз варіаційних кривих дальності польоту насіння після удару для всіх без виключення культур свідчить про значний розбіг цього показника як по фанері технічній так і по сталі, зі зміщенням в сторону більших величин на фанері технічній. При цьому більш округлі насіння мають більшу величину польоту після удару і вона є більш сталою. Фанеру технічну можна рекомендувати в якості робочої поверхні багатоярусного ударного сепаратора.

10. Встановлено, що при сепарації на багатоярусному ударному сепараторі маса 1000 зернин усіх культур зростає від 1 до 5 лотка, при цьому більш пружні насіння потрапляють в 3-5 лотки з більшою масою 1000 зернин, схожістю та енергією проростання і можуть бути рекомендовані для сівби.

Визначені оптимальні значення параметрів сепарації зерна на гравітаційному багатоярусному ударному сепараторі: поперечний кут $\alpha = 34^\circ$, поздовжній кут $\beta = 6^\circ$ і подача зерна $Q = 60$ кг/год.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Бакум В.В. Обоснование параметров технологического процесса сепарации семенных смесей на фрикционных неперфорированных колеблющихся поверхностях: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.20.01 /Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. -

Харьков, 1984. - 20 с.

2. Высоцкий В.К. Сортирование семян по упругости //Селекция и семеноводство. - 1964. - №4. с 1214.

3. Жмай Л.Г. Обоснование параметров технологического процесса очистки и сортирования семян овощных культур на вибрационной семяочистительной машине: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.20.01 /Харьковский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. - Харьков, 1990. -20 с.

4. Заика П.М., Мазнев Г.Е. Сепарация семян по комплексу физико-механических свойств. - М.: Колос, 1978. - 287 с.

5. Птицын С.Д. Сепарация зерна при ударе: Доклады всесоюзной академии сельскохозяйственных наук им. В.И. Ленина. Вып. 3. - М.: Изд-во МСХ СССР, 1948. - С. 44-48.

6. Рябов П.И. Разделение семян по упругим свойствам / Труды Саратовского института механизации сельского хозяйства им. Калинина. Вып.11. - Саратов, 1957. - С.

7. Филинков Н.И. Сепарация зерновых смесей по влажности методом удара//Вестник сельскохозяйственной науки.- 1972.- №1.- С.

8. Игнатьев М.Г. Исследование сепарации трудноотделимых семян по свойствам упругости: / Сб. научн. тр. Свердловского СХИ. - Свердловск: 1965 - Том.3. - с. 32-39.

9. Александров Е.В., Соколинский Б.В. Прикладная теория и расчет ударных систем. - М.: Наука, 1969. - 199 с.

10. Бабицкий В.И. Теория виброударных систем.- М.: Наука, 1978. - 352 с.

11. Бидерман В.Л. Теория удара. - М.: Машгиз, 1952. -76 с.

12. Гладков Г.Г. Зерноочистительные машины. - М.: Машгиз, 1950. - С.95-98

13. Заика П.М. Вибрационные зерноочистительные машины. - М.: Машиностроение, 1967. - 215 с.

14. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. -К.: Наукова думка,

1969. -249 с.

15. Богомолов А.В. Контактная задача при ударе зерна об отражающую поверхность // „Прогресивні ресурсозберігаючі технології та їх економічне обґрунтування у підприємствах харчування. Економічні проблеми торгівлі”. Зб. наук. пр.- Харків: ХДАТОХ, 2001. - Ч.1. - С. 281-287.

16. Дека вибрационного сепаратора: А.с. № 1747200 СССР, МКИ В 07 В 13/00 /П.М.Заика, И.В.Чалый, С.Д.Бакеев, А.В.Богомолов. - № 4858958/03; Заявл. 28.05.90; Оpubл. 15.07.92, Бюл. № 26. - 3 с.

17. Способ разделения зернистых материалов: А.с. № 1690864 СССР, МКИ В 07 В 13/00 / П.М.Заика, А.В.Козаченко , А.И.Завгородний, А.В.Богомолов и др. - № 4691210/03; Заявл. 16.05.89; Оpubл.15.11.91, Бюл. №42. - 5 с.

18. Устройство для разделения зерновых смесей по упругости: А.с. № 1526008 СССР, МКИ В07В 13/00 /П.М. Заика, А.В. Козаченко, А.И. Завгородний, А.В. Богомолов. - №4162603/29-03; Оpubл. 16.12.86. - 4с.

19. Справочник машиностроителя /Под редакцией Н.С.Ачеркан. Т.1. - М.: Машгиз., 1955. - 567 с.

20. Борисенко А.И., Таранов И.Е. Векторный анализ и начала тензорного исчисления. - Харьков: Вища школа, 1986. - 215 с.

21. Варченко Н.А., Ляшко И.И., Швецов К.И. Графики функций. - К.: Наукова думка, 1979. - 319 с.

22. Богомолов О.В., Тищенко Л.М. Приоритетні напрямки розвитку переробної галузі агропромислового комплексу // Проблеми ефективного функціонування АПК в умовах нових форм власності та господарювання. Т.2. - Київ. - 2001. - С. 665-669.

23. Дека вибрационного сепаратора: А.с. № 1535657 СССР, МКИ В 07 В 13/00 /П.М.Заика, И.В.Чалый, С.Д.Бакеев, А.В.Богомолов. - № 4440055/30-03; Заявл. 25.04.884; Оpubл. 15.01.90, Бюл. № 2. - 4 с.

24. Наумов И.А. О релаксационных и других упруго-кинетических свойств зерна пшеницы //Вопросы повышения качества зерна, муки и крупы: Тр. научной

конференции 28-30 октября 1965г. - Волгоград 58-59, 1967. – 513 с.

25. Александров Н.В., Яшкин А.Я. Курс общей физики.- М.: Просвещение, 1978. - 416 с.

26. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. - М.: Наука, 1965. - 204 с.

27. Влияние влажности зерна при уборке и обработке на качество семян //Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья. - 2002. - № 20. - С.28-29.

28. Пугачев А.Н. Повреждение зерна машинами. - М.: Колос, 1976. - 320 с.

29. Богомолов А.В. О влиянии слабоскрепленной оболочки зерна на коэффициент восстановления скорости при ударе // Всеукраїнський науково-технічний журнал „Вибрації в техніці та технологіях”. - № 6.- 2003. - С.35-38.

30. Эльсгольц П.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. - М.: Наука, 1969. - 424 с.

31. Вольмир А.С. Гибкие пластинки и оболочки. - М.: Гостехиздат, 1966. - 214 с.

32. Богомолов О.В. Елементи теорії ударних сепараторів зернових сумішей //Вісник ДонДУЕТ. Серія „Технічні науки”. 2(14). - 2002,- С. 67-80.

33. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах. - К.: Изд-во УСХА, 1998. - 625 с.

34. Блехман Н.Н., Джанелидзе Г.Ю. Вибрационное перемещение. - М.: Наука, 1964. - 410 с.

35. Вибрационная машина для очистки и сортирования зерна: А.с. № 1514424, СССР, МКИ В 07 В 13/00 / П.М.Заика, А.В. Козаченко, А.В.Богомолов, А.Д.Михайлов. - № 4349058/29-03; Заявл. 28.12.87; Оpubл. 15.10.89, Бюл. № 38. - 3 с.

36. Вибрационный сепаратор для разделения смеси семян по упругим свойствам: А.с.№ 1459738 СССР, - МКИ В 07 В 9/00 / П.М.Заика, В.М.Лукияненко, А.В.Богомолов и др. - № 4214968/29-03; Заявл. 23.03.87;

Опубл. 23.02.89, Бюл. № 7. - 3 с.

37. Устройство для сортировки семян: А.с. № 122233 СССР, МКИ В 07 В 13/00 / П.М.Заика, С.Д.Бакеев, А.В.Богомолов, И.В.Чалый. - № 3728592/29-03; Заявл. 16.04.84; Опубл. 7.04.86, Бюл. № 13. - 3 с.

38. Богомолов А.В., Шаповаленко О.И. Сепарация зерна при многократном ударе об отражательные поверхности // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім.П.Василенка. Вип.38. Харків: ХНТУСГ, 2005. с. 5-15.

39. Богомолов О.В. Обоснование возможности сепарации зерновых смесей по упругости //Прогресивні технології та удосконалення процесів харчових виробництв: Зб.наук.пр.- Харків: ХДАТОХ, 2000. - Ч.2. - С. 141-147.

40. Богомолов О.В., Зинченко М.О., Токолов Ю.І., Денисенко С.А. Сепарация зерновых сумешей на багатоярусній ударній гирці. // Тези доповідей міжнародної науково - практичної конференції "Актуальні проблеми харчування: технологія та обладнання, організація і економіка. ", - Донецьк: 2003. - С. 14-20.

41. Пристрій для розподілу для зернових матеріалів за пружними властивостями: Д.п. № 57958 Україна, МКВ В 07 В 13/00. О.В.Богомолов, Ю.І.Токолов, М.О.Зінченко - № 200203187; Заявл. 7.03.2002; Опубл. 15.07.2003, Бюл. № 7. - 2 с.

42. Багатоярусний ударний сепаратор: Патент на корисну модель №62244, Україна, МКВ В07 В13/00, Богомолов О.В., Богомоллова В.П. №201014867. Опубл. 25.08.2011. Бюл. №16.-4с.

43. 1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Издательство «Наука», М., 1976 г. с. 278

44. Кононюк А.Е. Основы научных исследований том 1. Издательство «КТН» 04210, г.Киев, пр. Героев Сталинграда, 8, корпус 8, оф. 1. Киев 2010

ЗМІСТ

№	Назва	Стор.
1	ВСТУП	3
2	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО ВСТУПУ	6
3	РОЗДІЛ 1 КОНСТРУКТИВНО-КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗАВАНТАЖЕННЯ НОРІЙНИХ КОВШІВ ЗЕРНОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ	10
4	1.1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ РОБОТ, ПРИСВЯЧЕНИХ МЕХАНІЦІ СИПКИХ СЕРЕДОВИЩ ТА ЗАПОВНЕННЮ НОРІЙНИХ КОВШІВ	12
5	1.1.1. ДОСЛІДЖЕННЮ ПРОЦЕСУ ЗСУВУ В СИПКИХ ТІЛАХ	12
6	1.1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ НОРІЙНИХ КОВШІВ ЗЕРНОВИМИ МАТЕРІАЛАМИ	25
7	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.1	32
8	1.2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОПОРУ ЗСУВУ ЗЕРНОВОГО ШАРУ	33
9	1.2.1. НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЗЕРНОВОГО ШАРУ ТА ЙОГО ПАРАМЕТРИ ПРИ ЗСУВІ	33
10	1.2.2. ВИЗНАЧЕННЯ ОПОРУ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗСУВУ НА ВІСЕСИМЕТРИЧНОМУ ВІДКОСІ	42
11	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.2	47
12	1.3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОВШІВ ЗЕРНОВИХ НОРІЙ	49

13	1.3.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ ПРИ ЗАЧЕРПУВАННІ З НАСИПУ	49
14	1.3.1.1. ОБҐРУНТУВАННЯ ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗАЧЕРПУВАННЯ	49
15	1.3.1.2. ДИНАМІКА РУХУ ЧАСТИНОК ШАРУ ПО ПОХИЛІЙ ПОВЕРХНІ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ У ВЕРТИКАЛЬНІЙ ПЛОЩИНІ ЩОДО ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ	50
16	1.3.1.3. ВИЗНАЧЕННЯ ТОВЩИНИ ВИТИСНЕНОГО ШАРУ І КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ	56
17	1.3.1.4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ	65
18	1.3.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОНСТРУКТИВНО-КІНЕМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОВШІВ НОРІЙ ПРОТИ ХОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕМЕНТА	68
19	1.3.2.1. ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ВИТІКАННЯ ЗЕРНОВОГО МАТЕРІАЛУ З ЖИВЛЯЧОГО ЛОТКУ	69
20	1.3.2.2. ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ	71
21	1.3.2.3. ОБҐРУНТУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВИСОТИ УСТАНОВКИ ЖИВИЛЬНОГО ЛОТКА	77
22	1.3.2.4. АНАЛІЗ РОЗРАХУНКОВИХ ЗНАЧЕНЬ ПАРАМЕТРІВ ЗА ОТРИМАНИМИ ЗАЛЕЖНОСТЯМИ	79
23	1.3.2.5. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ ПРИ ЗАВАНТАЖЕННІ ПО ХОДУ ТЯГОВОГО ЕЛЕМЕНТА	84
24	1.3.2.6. ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ЗАЧЕРПУВАННЯ ПРИ ПУСКУ НОРІЇ	87
25	1.3.3. ОПІР ЗАЧЕРПУВАННЮ ПРИ СТАЛОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ	93

26	1.3.4. ОПІР ЗАЧЕРПУВАННЯ ПО ХОДУ ТЯГОВОГО ОРГАНУ	97
27	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.3	99
28	1.4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТОСТІ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ОПОРУ ЗСУВУ ТА ПАРАМЕТРІВ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ ПРИ ДОСИПАННІ З ЛОТКА	100
29	1.4.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ	101
30	1.4.2. ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЕНТІВ ТЕРТЯ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ РУСІ ПО ОПОРНИХ ПОВЕРХНЯХ	123
31	1.4.3. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗЕРНОВОГО ПОТОКУ З ЖИВИЛЬНОГО ЛОТКА НОРІЇ	127
32	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.4	132
33	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 1.1	134
34	РОЗДІЛ 2 НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА БАГАТОФАЗНОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ РУСІ ПО РОБОЧИМ ОРГАНАМ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ ВІБРОВІДЦЕНТРОВОГО СЕНПАРАТОРА	141
35	2.1. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКИ СУМІШІ «ЗЕРНО-ДОМІШКИ» НА ТАРІЛЧАСТОМУ РОЗКИДАЧІ	141
36	2.2. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНОВИХ СУМІШЕЙ В ОСНОВНІЙ КІЛЬЦЕВІЙ ЗОНІ	189
37	2.3. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКИ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НА КОНУСНО-КАСКАДНІЙ ПОВЕРХНІ ПНЕВМОСЕПАРУЮЧОГО ПРИСТРОЮ	205
38	2.3.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ	205

39	2.4. НЕЛІНІЙНА ДИНАМІКА ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НА КОНУСНО-КАСКАДНІЙ ПОВЕРХНІ	218
40	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	243
41	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 2	247
42	РОЗДІЛ 3 ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ КАЛІБРУВАННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ КУКУРУДЗИ ЗА РОЗМІРАМИ ЗЕРНІВОК	260
43	3.1. РЕШЕТА ДЛЯ КАЛІБРУВАННЯ КУКУРУДЗИ З ОТВОРАМИ У ФОРМІ ОВАЛУ КАССІНІ	260
44	3.1.1. ЛАБОРАТОРНІ ТА ВИРОБНИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ РЕШЕТА З ОТВОРАМИ У ФОРМІ ОВАЛУ КАССІНІ	267
45	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	272
46	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 3	273
47	РОЗДІЛ 4 ТЕХНОЛОГІЯ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ	274
48	4.1. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СЕГРЕГАЦІЇ НАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ	275
49	4.1.1. АНАЛІЗ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ	275
50	4.2. ОСНОВНІ РІВНЯННЯ ГІДРОДИНАМІКИ БАГАТОФАЗНОЇ СИСТЕМИ, ЯКІ МОДЕЛЮЮТЬ ПСЕВДОРОЗРІДЖЕНИЙ НАСІННЄВИЙ МАТЕРІАЛ	290
51	4.2.1. ТЕОРЕТИЧНИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОГО КОЕФІЦІЄНТУ ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ ПСЕВДОРОЗРІДЖЕНОГО НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ	296

52	4.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ГУСТИНОЮ НАСІННЯ	305
53	4.4. ВІБРОПНЕВМОВІДЦЕНТРОВІ СЕПАРАТОРИ	310
54	4.5. МЕХАНІКО-МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РУХУ ЧАСТКИ НАСІННЄВОГО МАТЕРІАЛУ У ВІБРОПНЕВМОРОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ В ПОЛІ ВІДЦЕНТРОВОЇ СИЛИ	314
55	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	327
56	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 4	328
57	РОЗДІЛ 5 ТЕХНОЛОГІЇ РОЗДІЛЕННЯ НАСІННЕВОГО МАТЕРІАЛУ ЗА ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	332
58	5.1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЧАСТИНОК ЗЕРНА	332
59	5.2. ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ СЕПАРАЦІЇ НАСІННЯ ЗА ПРУЖНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ	339
60	5.3. ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРУ КУЛЯСТОЇ ЧАСТИНКИ З ПЛОЩИНОЮ	346
61	5.4. ВПЛИВ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБОЛОНКИ ЗЕРНА НА ПРУЖНІСТЬ ПРИ УДАРІ	357
62	5.5. РОЗРОБКА ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДАРНИХ СЕПАРАТОРІВ	366
63	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ ДО РОЗДІЛУ 5	390
64	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ДО РОЗДІЛУ 5	392

Наукове видання

БРЕДИХІН Вадим Вікторович
БОГОМОЛОВ Олексій Васильович
СЛІПЧЕНКО Максим Володимирович
КІСЬ-КОРКІЩЕНКО Лілія Вікторівна
ІВАЩЕНКО Сергій Григорович
ІРКЛІЄНКО Віктор Іванович
ЧЕРНЯЄВ Олександр Олександрович
ТІКУНОВ Станіслав Романович

**НАУКОВІ ОСНОВИ ОЩАДЛИВОЇ
ПІДГОТОВКИ НАСІННЯ З ПОЛІПШЕНИМ
БІОЛОГІЧНИМ ПОТЕНЦІАЛОМ**

Монографія

Видається в авторській редакції

Комп'ютерна верстка *С. Г. Іващенко*

Підписано до друку 19.05.2023.
Формат 60×84 $\frac{1}{16}$, Папір офсетний. Гарнітура Times.
Обл.-вид. арк. 10,4. Ум. друк. арк. 23,7.
Тираж 500 прим.

Надруковано у друкарні ТОВ «Діса+»
61111, Харків, шосе Салтівське буд.154
Тел. (057)768-03-15, e-mail: disadruk@gmail.com
Свід.суб.вид.справи ДК № 4047 від 15.04.2011
Адреса виробництва:
61000 Харків, Ващенковський в'їзд, 16

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток