

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

**Кісь-Коркіщенко Лілія Вікторівна**

УДК 631.362

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОБґРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-КІНЕМАТИЧНИХ**  
**ПАРАМЕТРІВ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОВШІВ ЗЕРНОВИХ НОРІЙ**

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Л. В. Кісь-Коркіщенко.

Науковий керівник: доктор технічних наук,  
професор **Богомолів Олексій Васильович**

Харків – 2021 р.

## АНОТАЦІЯ

**Кісь-Коркіщенко Л. В.** Обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. – Державний біотехнологічний університет Міністерства освіти і науки України – Харків – 2021.

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 результати 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 залишається завдання дослідження процесу завантаження ковшів, від якого залежить продуктивність норії і сталість її роботи. Цій проблемі присвячено незначну кількість робіт, а отримані результати не відображають фізичну сутність процесу і не відповідають даним, отриманим в процесі експлуатації.

Незважаючи на 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, коефіцієнтів тертя при русі по опорних поверхнях і при лавиноподібному витіканню по спусках. Визначення цих властивостей є актуальним завданням механіки сипучих матеріалів.

Дисертаційне дослідження присвячено вирішенню питань, пов'язаних з визначенням фізико-механічних властивостей сипучого зернового матеріалу і з процесами заповнення ковшів зернових норій при різних способах їх завантаження. Таким чином тема дисертаційної роботи є актуальною в науковому і прикладному відношенні, а результати роботи сприяють розвитку зернової галузі сільського господарства та підвищення експортного потенціалу України.

Метою дослідження є підвищення продуктивності зернових норій із забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів через обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів.

Відповідно до поставленої мети виконано такі завдання:

- виконати аналітичне дослідження пружності зернового шару та його опору внутрішньому зсуву;
- провести аналітичне дослідження процесів заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу, завантажені проти ходу та по ходу тягового елемента;
- теоретично дослідити опір зачерпуванню при різних режимах роботи норії;
- експериментально визначити коефіцієнт опору зсуву двома способами: за параметрами осесиметричного укусу та прямим зсувом;
- експериментально визначити коефіцієнт тертя зернового матеріалу пластиковими та сталевими поверхнями;
- визначити умови та параметри лавиноподібного руху шару зернового матеріалу по нахиленій поверхні розробленим експериментальним пристроєм.

Об'єктом дослідження є завантаження норійних ковшів з урахуванням фізико-механічних властивостей шару зернового матеріалу.

Відповідно, предметом дослідження є закономірності впливу конструктивно-кінематичних параметрів норій на завантаження ковшів зерновими матеріалами.

Методи дослідження, що застосовувались у роботі є аналітичні дослідження з використанням методів теорії пружності, законів фізики та теоретичної механіки, планування експерименту що до визначення кількості повторень іспитів залежно від відносної похибки вимірювань та необхідного проценту надійності, методики графічної обробки даних іспитів, застосування розроблених пристроїв та сучасних вимірювальних приладів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше встановлено залежності дотичних напружень, кутових деформацій зернового шару та коефіцієнту опору зсуву від параметрів укусу, що враховують параметри внутрішнього зсуву; вперше аналітичними методами визначено коефіцієнт заповнення ковшів та коефіцієнти опору при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента.

Отримав подальший розвиток метод визначення параметрів внутрішнього зсуву та граничних значень функції текучості зернових матеріалів і раціональних конструкційно-кінематичних параметрів заповнення ковшів, що на відміну від відомих враховує дотичні напруження, кутові деформації зернового шару та коефіцієнт опору;

Удосконалено метод розрахунку зернових норій, що на відміну від відомих враховує коефіцієнт заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що залежності отримані в процесі аналітичних та експериментальних досліджень, дозволяють визначити раціональні конструктивні і кінематичні параметри робочих органів, які забезпечують задану продуктивність та стабільність роботи норії.

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 на роботу в оптимальному режимі на ООО СП «Білий колодязь». Результати роботи випроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету у наступних дисциплінах: «Організація технологічного процесу елеваторної промисловості», «Експлуатація та обслуговування машин ПХВ», «Проектування підприємств зберігання і переробки зерна», «Основи зберігання і переробки зерна».

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, що виявляється в обґрунтуванні конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій через із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів. Це дозволило підвищити продуктивність зернових норій та забезпечити стабільність заповнення завантаження ковшів.

Основні наукові результати виконаних досліджень полягають в наступному:

Проведеним узагальненням результатів відомих досліджень встановлено, що залишається не вирішеним завдання підвищення продуктивності зернових норій із забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів. Статистичні методи визначення ефективних кутів внутрішнього тертя не відображають повністю процес взаємодії часток при зсуві. Процес зачерпування розглядався, як схема черпання одним ковшем, у той час як при роботі норії це реалізується послідовно групою ковшів з зовсім іншою схемою їх заповнення.

Вирішено науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення продуктивності зернових норій та забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів. Встановлено залежності дотичних напружень, кутових деформацій зернового шару та коефіцієнту опору зсуву від параметрів укусу,

що на відміну від відомих враховують параметри внутрішнього зсуву. Аналітичними методами визначено коефіцієнт заповнення ковшів та коефіцієнтів опору при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента, що враховують, що на відміну від відомих враховує дотичні напруження, кутові деформації зернового шару та коефіцієнт опору.

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. Значення відносної кутової деформації зсуву  $Y$  для пшениці  $Y = 0,520$ ; проса – 0,492; гороху – 0,487; сої – 0,477; ячменю – 0,563; вівсу – 0,446; жита – 0,590; гречки – 0,523; кукурудзи – 0,580; соняшнику – 0,450.

При запуску норії після завантаження бункера і утворення насипу відбувається заповнення ковшів, занурених в насип. Встановлено, що коефіцієнт зачерпування складає  $K_{зач} = 2,416$ , а загальний опір зачерпування –  $F_{дс} = 279,6$  Н. Запуск норії при порожньому бункері призводить до його тривалого заповнення і до тривалої роботи норії зі зниженою продуктивністю. Коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії складає –  $K_{зач} = 1,748$ ; опір зачерпування  $F_{дп} = 202,2$  Н. Збільшення коефіцієнтів зачерпування при збільшенні швидкостей руху носить нелінійний зростаючий характер. При швидкостях понад 5 м/с різко зростає питома потужність приводу.

Всі зернові матеріали з вологістю  $W < 12,5\%$  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 зерна з вологістю 14%

та вище.

При прямому падаючому потоці, через розширення живильного потоку, особливо для кулеподібних зернин (горох, соя), при лавиноподібному русі за рахунок відскоку, значна частина зерна може не потрапити в ковш. Коефіцієнт розширення потоку досягає значень  $K_H = 1,89-2,9$  для різних матеріалів, при косому падінні  $K_H = 1,15-1,2$ , в зв'язку з цим пряму подачу не рекомендовано для сировини з вологістю  $W < 12\%$  та для кулеподібних зернин.

Експериментальними дослідженнями лавиноподібного потоку встановлено, що не рекомендується застосовувати пряму подачу: для кулеподібних крупних зерен (гороху, сої та ін.); для сипких матеріалів з вологістю до 12 %. Косу подачу застосовувати обов'язково для тягових органів з кількістю ковшів на 1 м, що наближається до максимально допустимого.

Результати дослідження впроваджено на ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» (м. Карлівка) з економічним ефектом від впровадження у серійне виробництво 105 тис. грн. та ООО СП «Білий колодязь» з економічним ефектом 120 тис. грн. Результати роботи впроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету (ХНТУСГ ім. П. Василенка).

**Ключові слова:** норія, ковш, коефіцієнт опору зсуву, дотичне напруження, пористість, коефіцієнт тертя, коефіцієнт заповнення, коефіцієнт зачерпування, завантажувальний лоток, параметри витікання.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1. Кісь Л. В. Енергетичні втрати в стрічково-барабанних механізмах норій-елеваторів. *Машинобудування. Збірник наукових праць УІПА*, 2017. Вип.

20. С. 6–10.

2. 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»*. Вісник ХНТУСГ. Харків: ХНТУСГ, 2018. Вип. 194. С. 78–89.

3. Oscillations with positional friction under mechanicals hock / [Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Viktor Irklienko, Lilia Kys-Korkyshenko]. – *TeKa. Quarterly Journal of Agri-food Industry*, 2019. Vol. 19. № 1. P. 49–58.

4. V. I. Irklienko, O. V. Bogomolov, I. M. Lukivanov, L. V. Kis-Korkishchenko, P. S. Syromiatnikov. Developing environmentally friendly technology for wheat grain processing. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2021. Vol. 11(2). PP. 352-359. doi: 10.15421/2021\_122.

5. Кись-Коркіщенко Л. В. Про пружні властивості та опір зсуву шару зернових матеріалів. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*, 2021. № 23. 2021 р. С. 65–69.

6. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись-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.

7. Пат. 13397 Україна, МПК В65G 23/04 (2006.01), В65G 17/36 (2006.01). Ківшевий елеватор / Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись Л. В.; заявник Лук'янов І. М. – № u 2018 05427; заяв. 16.05.2018; надрук. 10.12.18, Бюл. № 23.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

8. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись Л. В. Особливості

д

е

ф

о

р

м



тиском у машинобудуванні та металургії» (22-24 листопада 2017, м. Харків). Харків: НТУ ХПИ, 2017. С. 19–20.

9. Кись Л. В., Богомолов О. О. К вопросу о загрузке сельскохозяйственных зерновых ковшовых элеваторов. *Матеріали XIV-го міжнародного форуму молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (5-6 квітня 2018 р., м. Харків)*. Харків: ХНТУСГ ім. П.Василенка, 2018. С. 91.

10. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись Л. В., Богомолов О. О. Підвищення ефективності роботи зернових норій. *Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність (м. Харків)*. Харків: ХДУХТ, 2018. С. 309–310.

11. Богомолов О. В., Кись-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.

12. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись-Коркіщенко Л. В. Заповнення норійних ковшів при зачерпуванні зернового матеріалу. *Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (4-6 вересня 2019 р., м. Харків – м. Мелітополь – с. Кирилівка)*. ХДУХТ, ТДАТУ, 2019. С. 21–23.

13. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кись-Коркіщенко Л. В. Особливості структурних деформацій шару зернових матеріалів і їх вплив на опір зрушення. *Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні напрямки технології та процесів переробних і харчових виробництв» (7-8 листопада 2019 р., м. Харків)*. Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2019. С. 61–62.

14. Богомолів О. В., Кісь-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.

15. 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.

Праці, які додатково відображають наукові матеріали дисертації:

16. 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. Zamazy, 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.

17. Моделювання процесу здрібнення зернівки у робочий камері здрібнювача сколювальної дії / Богомолів 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.

## ABSTRACT

**Kis-Korkishchenko L. V.** Substantiation of structural and kinematic parameters of loading buckets of grain elevators.

Dissertation for the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 Industrial Engineering. – State Biotechnological University of the Ministry of Education and Science of Ukraine – Kharkiv – 2021.

Due to the expansion of the volume of loading and unloading operations in the performance of various technological operations with grain materials, the demand for highly efficient bucket elevator of different productivity and height is increasing. In the process of their improvement, to the stability of work and reliability were achieved significant results through the use of new materials and research results. Particular importance was attached to the study of unloading processes, because it was believed that the loss of productivity was associated with the formation of the so-called backfill in both the working and idle pipes.

However, to date, the problem remains the study of the process of loading buckets, which depends on the productivity of the bucket elevator and the sustainability of its work. A small amount of work is devoted to this problem, and the results obtained do not reflect the physical nature of the process and do not correspond to the data obtained during operation.

Despite the simplicity, the process has a complex dynamic nature, which depends not only on the structural and kinematic parameters of the load, but also on poorly studied, specific physical and mechanical characteristics of grain materials such as layer elasticity, resistance to shear inside the material, porosity at different packing densities. Coefficients of friction during movement on bearing surfaces and at avalanche-like flow on descents. Determining these properties is an urgent task in the mechanics of bulk materials.

The dissertation research is devoted to the decision of the questions connected with definition of physical and mechanical properties of loose grain material and

with processes of filling of ladles of grain burrows at various ways of their loading. Thus, the topic of the dissertation is relevant in scientific and applied terms, and the results of the work will help the development of the grain sector of agriculture and increase the export potential of Ukraine.

The purpose of the study is to increase the productivity of grain burrows with ensuring the stability of the filling of the buckets through the justification of structural and kinematic parameters, taking into account the physical and mechanical properties of grain materials.

In accordance with the goal the following tasks were performed:

- perform an analytical study of the elasticity of the grain layer and its resistance to internal shear;
- to conduct an analytical study of the processes of filling buckets when scooping from the embankment, loaded against the course and along the traction element;
- theoretically investigate the resistance to scooping in different modes of operation of the bucket elevator;
- experimentally determine the coefficient of shear resistance in two ways: by the parameters of the axisymmetric slope and direct shear;
- experimentally determine the coefficient of friction of grain material with plastic and steel surfaces;
- to determine the conditions and parameters of avalanche-like movement of the layer of grain material on the inclined surface by the developed experimental device.

The object of the study is the loading of bucket elevator buckets, taking into account the physical and mechanical properties of the layer of grain material.

Accordingly, the subject of the study is the patterns of influence of structural and kinematic parameters of bucket elevator on the loading of buckets with grain materials.

The research methods used in the work are analytical studies using the

methods of elasticity theory, laws of physics and theoretical mechanics, experiment planning to determine the number of test repetitions depending on the relative measurement error and the required percentage of reliability, methods of graphical processing of exam data, application of developed devices and modern measuring instruments.

The scientific novelty of the obtained results is that for the first time the dependences of the tangential stresses, angular deformations of the grain layer and the shear resistance coefficient on the slope parameters, which take into account the parameters of the internal shear; for the first time the coefficient of filling of buckets and coefficients of resistance at scooping from an embankment and loaded on the course and against a course of a traction element are defined by analytical methods.

The method of determining the parameters of internal shear and limit values of the yield strength of grain materials and rational structural and kinematic parameters of bucket filling, which, in contrast to the known ones, takes into account tangential stresses, angular deformations of the grain layer and coefficient of resistance; the method of calculating grain burrows has been improved, which, in contrast to the known ones, takes into account the coefficient of bucket filling when scooping from the embankment and loaded along and against the traction element.

The main scientific results of the research are as follows:

The generalization of the results of known studies shows that the problem of increasing the productivity of grain burrows with ensuring the stability of the loading of buckets, taking into account the physical and mechanical properties of grain materials. Statistical methods for determining the effective angles of internal friction do not fully reflect the process of interaction of particles during shear. The scooping process was considered as a scheme of scooping by one bucket, while in the work of the bucket elevator it is implemented sequentially by a group of buckets with a completely different scheme of their filling.

The scientific and applied problem aimed at increasing the productivity of grain burrows and ensuring the stability of filling the bucket loading by

substantiating the structural and kinematic parameters. The dependences of the tangential stresses, angular deformations of the grain layer and the shear resistance coefficient on the slope parameters are established, which, in contrast to the known ones, take into account the internal shear parameters. Analytical methods determine the fill factor of buckets and coefficients of resistance when scooping from the embankment and loaded along and against the traction element, taking into account that in contrast to the known tangential stresses, angular deformations of the grain layer and the coefficient of resistance.

It is established that the elasticity and shear resistance are determined by the need to overcome forces from the action of orthogonal tangential stresses due to angular deformation of the grain stacking structure and tangential rolling friction stresses at the exit of grains from gearing. The value of the relative angular deformation of the shear  $Y$  for wheat  $Y = 0.520$ ; millet – 0.492; peas – 0.487; soybeans – 0.477; barley – 0.563; oats – 0.446; rye – 0.590; buckwheat – 0.523; corn – 0.580; sunflower – 0.450.

When starting the bucket elevator after loading the hopper and the formation of the embankment is filling the buckets, immersed in the embankment. It is established that the scooping factor is  $K_{ZACH} = 2,416$ , and the total scooping resistance is  $F_{ds} = 279.6$  N. Starting the noria with an empty hopper leads to its long-term filling and long-term operation of the bucket elevator with reduced productivity. The coefficient of scooping at a constant mode of operation of the bucket elevator is –  $K_{ZACH} = 1,748$ ; scooping resistance  $F_{dp} = 202.2$  N. The increase in scooping coefficients with increasing speeds is nonlinear increasing. At speeds above 5 m / s, the specific power of the drive increases sharply.

All grain materials with a moisture content of  $W < 12.5\%$  must be loaded into the bucket along the way. Wheat with an optimum humidity of 14.5% and above can be loaded against the stroke. Corn grain has a more elastic and fragile shell and soft endosperm, so its susceptibility to injury is very high. Even at optimum humidity of corn of 14% of loading it is necessary to spend on the move. In addition, noria

operation should occur at speeds of 0.7–1.2 m/s for dry grain ( $W < 12\%$ ) and 1.2–2 m/s and for grain with a moisture content of 14% and above.

With direct falling flow, due to the expansion of the nutrient flow, especially for spherical grains (peas, soybeans), with avalanche-like movement due to rebound, a significant part of the grain may not get into the bucket. The flow expansion coefficient reaches the values of  $K_N = 1.89–2.9$  for different materials, with an oblique drop of  $K_N = 1.15–1.2$ , in this regard, direct feed is not recommended for raw materials with a humidity of  $W < 12\%$  and for spherical grains.

Experimental studies of avalanche-like flow have shown that it is not recommended to use direct feed: for large spherical grains (peas, soybeans, etc.); for bulk materials with humidity up to 12%. The oblique feed must be used for traction bodies with the number of buckets per 1 m, which is close to the maximum allowable.

The results of the study were implemented at PJSC "Karliv Machine-Building Plant" (Karlivka) with the economic effect of the introduction into serial production of 105 thousand UAH. and LLC JV "White Well" with an economic effect of 120 thousand UAH. The results of the work were introduced into the educational process of the State Biotechnological University (KhNTUSG named after P. Vasylenko).

**Key words:** bucket elevator, ladles, shear resistance coefficient, shear stresses, porosity, friction coefficient, filling factor, scooping coefficient, loading chute, outflow parameters.

## ЗМІСТ

ЗМІСТ .....	16
ВСТУП .....	19
РОЗДІЛ 1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	24
1.1 Огляд робіт, присвячених дослідженню процесу зсуву в сипких тілах	25
1.2 Огляд робіт, з дослідження процесів завантаження норійних ковшів зерновими матеріалами .....	38
1.3 Висновки по розділу та завдання дослідження.....	50
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ОПОРУ ЗСУВУ ЗЕРНОВОГО ШАРУ.....	52
2.1 Напружено-деформований стан зернового шару та його параметри при зсуві .....	52
2.2 Визначення впливу опору зсуву зернових матеріалів на осесиметричному відкосі .....	61
2.3 Висновки по розділу .....	66
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ КОВШІВ ЗЕРНОВИХ НОРІЙ.....	68
3.1 Дослідження процесу заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу... 68	
3.1.1 Обґрунтування фізичної моделі процесу зачерпування.....	68
3.1.2 Динаміка руху частинок шару по похилій поверхні, що обертається у вертикальній площині щодо центру обертання .....	69
3.1.3 Визначення товщини витисненого шару і коефіцієнта заповнення.....	74
3.1.4 Результати розрахунків процесу завантаження.....	81
3.2 Визначення конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів норій проти ходу тягового елемента.....	84
3.2.1 Фізичні основи витікання зернового матеріалу з живлячого лотку.....	85
3.2.2 Визначення ступеня заповнення ковшів .....	87



3.2.3 Обґрунтування оптимальної висоти установки живильного лотка .....	91
3.2.4 Аналіз розрахункових значень параметрів за отриманими залежностями .....	93
3.2.5 Ефективність заповнення ковшів при завантаженні по ходу тягового елемента .....	97
3.2.6 Дослідження опору зачерпування при пуску норії .....	100
3.3 Опір зачерпуванню при сталому режимі роботи.....	104
3.4 Опір зачерпування по ходу тягового органу.....	109
3.5 Висновки по розділу .....	110
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРИСТОСТІ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ, ОПОРУ ЗСУВУ ТА ПАРАМЕТРІВ ЗАПОВНЕННЯ КОВШІВ ПРИ ДОСИПАННІ З ЛОТКА .....</b>	<b>113</b>
4.1 Планування експерименту та методика обробки даних дослідження	114
4.1.1 Визначення необхідної кількості дослідів .....	114
4.1.2 Методика графічної обробки дослідних даних .....	116
4.2 Дослідження фізико-механічних властивостей зернових матеріалів .	117
4.2.1 Визначення пористості зернових матеріалів при різній вологості	117
4.2.2 Визначення коефіцієнта зсуву по параметрам осесиметричного укосу .....	126
4.2.3 Визначення опору зрушенню зернових матеріалів.....	132
4.3 Визначення коефіцієнтів тертя зернових матеріалів при русі по опорних поверхнях .....	142
4.4 Визначення параметрів зернового потоку з живильного лотка норії...	146
4.5 Висновки по розділу .....	152
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>155</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>158</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>170</b>
Додаток А Технічні характеристики норій Н-25, Н-50, Н-100 .....	171

Додаток Б Технічні характеристики норій серії LBEВ виробництва Buhler .....	176
Додаток В Тарировочна залежність .....	178
Додаток Г Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження	179

## ВСТУП

**Актуальність теми.** 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 результати 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 залишається завдання дослідження процесу завантаження ковшів, від якого залежить продуктивність норії і сталість її роботи. Цій проблемі присвячено незначну кількість робіт, а отримані результати не відображають фізичну сутність процесу і не відповідають даним, отриманим в процесі експлуатації.

Незважаючи на 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, коефіцієнтів тертя при русі по опорних поверхнях і при лавиноподібному витіканню по спусках. Визначення цих властивостей є актуальним завданням механіки сипучих матеріалів.

Дисертаційне дослідження присвячено вирішенню питань, пов'язаних з визначенням фізико-механічних властивостей сипучого зернового матеріалу і з процесами заповнення ковшів зернових норій при різних способах їх завантаження. Таким чином тема дисертаційної роботи є актуальною в науковому і прикладному відношенні, а результати роботи спряють розвитку зернової галузі сільського господарства та підвищення експортного потенціалу України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота виконана відповідно до розділів комплексних тем Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка: «Продовольчо-зернова безпека зі створенням екологобезпечних, ресурсозберігаючих, енергоощадних механізованих технологій збереження і обробки врожаю і одержання високоякісних насіннєвих матеріалів» № 0116U004624 (2018–2022 рр.) та «Розробка перспективних технологій, технологічних процесів і засобів механізації в агропромислових комплексах держави» № 0117U005023 (2017–2021 рр.). Експериментальні дослідження виконано на кафедрі «Обладнання та інжинірингу переробних і харчових виробництв» ХНТУСГ ім. П. Василенка (Державного біотехнологічного університету).

**Мета дослідження:** підвищення продуктивності зернових норій із забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів через обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів.

**Завдання дослідження:**

- виконати аналітичне дослідження пружності зернового шару та його опору внутрішньому зсуву;
- провести аналітичне дослідження процесів заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу, завантажені проти ходу та по ходу тягового елемента;
- теоретично дослідити опір зачерпуванню при різних режимах роботи норії;
- експериментально визначити коефіцієнт опору зсуву двома способами: за параметрами осесиметричного укусу та прямим зсувом;
- експериментально визначити коефіцієнт тертя зернового матеріалу пластиковими та сталевими поверхнями;
- визначити умови та параметри лавиноподібного руху шару зернового матеріалу по нахиленій поверхні розробленим експериментальним пристроєм.

**Об'єкт дослідження:** завантаження норійних ковшів з урахуванням

фізико-механічних властивостей шару зернового матеріалу.

**Предмет дослідження:** закономірності впливу конструктивно-кінематичних параметрів норій на завантаження ковшів зерновими матеріалами.

**Методи дослідження:** аналітичні дослідження з використанням методів теорії пружності, законів фізики та теоретичної механіки, планування експерименту що до визначення кількості повторень іспитів залежно від відносної похибки вимірювань та необхідного проценту надійності, методики графічної обробки даних іспитів, застосування розроблених пристроїв та сучасних вимірювальних приладів.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

*Вперше:*

– встановлено залежності дотичних напружень, кутових деформацій зернового шару та коефіцієнту опору зсуву від параметрів укусу, що враховують параметри внутрішнього зсуву;

– аналітичними методами визначено коефіцієнт заповнення ковшів та коефіцієнти опору при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента.

*Отримав подальший розвиток:*

– метод визначення параметрів внутрішнього зсуву та граничних значень функції текучості зернових матеріалів і раціональних конструкційно-кінематичних параметрів заповнення ковшів, що на відміну від відомих враховує дотичні напруження, кутові деформації зернового шару та коефіцієнт опору;

*Удосконалено:*

– метод розрахунку зернових норій, що на відміну від відомих враховує коефіцієнт заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Залежності, що отримані в процесі аналітичних та експериментальних

досліджень, дозволяють визначити раціональні конструктивні і кінематичні параметри робочих органів, які забезпечують задану продуктивність та стабільність роботи норії.

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 на роботу в оптимальному режимі на ООО СП «Білий колодязь». Результати роботи випроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету у наступних дисциплінах: «Організація технологічного процесу елеваторної промисловості», «Експлуатація та обслуговування машин ПХВ», «Проектування підприємств зберігання і переробки зерна», «Основи зберігання і переробки зерна».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення і результати, що отримані здобувачем і наведені у дисертації, базуються на розробках і дослідженнях, виконаних здобувачем самостійно та викладені у роботах [1–17]. У наукових роботах, які опубліковано у співавторстві, здобувачу належать: результати огляду і аналіз досліджень, визначення напрямку підвищення ефективності процесу зачерпування [8–10], результати математичного моделювання визначення руху зернівки у ковші [6, 11, 14]. Здобувачем самостійно виготовлені необхідні пристрої, експериментальна установка та розроблені методики їх використання [5, 12, 13]. Публікації які відображають результати досліджень, оформлені і виконані особисто автором [1, 5]. Запропоновано ряд покращень конструкцій норій [2, 15]. В дисертації не використано ідеї співробітників, що сприяли виконанню роботи. Їх участь обмежена допомогою при проведенні окремих експериментів.

**Апробація результатів в дисертації.** Результати досліджень були

представлені на: IX Міжнародної науково-практичної конференції «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії». – Харків: НТУ ХПИ. 22-24 листопада 2017 р.; XIV-XVI-го міжнародних форумах молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» – Х.: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 5-6 квітня 2018 р., 4-5 квітня 2019 р., 25-26 березня 2020р.; Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність». – Х.: ХДУХТ. – 2018; III Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності». - Харків – Мелітополь – Кирилівка. ХДУХТ, ТДАТУ. 4-6 вересня 2019 р.; XX-XXI Міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» – Х.: ХНТУСГ ім. П. Василенка відповідно 7-8 листопада 2019р.; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки». Кропивницький: ЦНТУ 5-6 листопада 2019 р.

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, у тому числі: 5 статей у спеціалізованих наукових виданнях України, 2 статті у міжнародних виданнях, що включено до міжнародної наукометричної бази **Web of science**, 1 стаття у Польщі (ТЕКА, Copernicus), 9 тез у збірниках доповідей наукових конференцій та 1 патент України на корисну модель.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 181 сторінок, у тому числі 4 додатків на 12 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації становить 156 сторінок, 50 рисунків та 21 таблиця. Список використаних джерел нараховує 120 найменувань на 12 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Визначення кінематично-конструктивних параметрів зачерпування норійних ковшів неможливо без наукового обґрунтування механіки сипких тіл та урахування 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 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 работ 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 Огляд робіт, присвячених 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  $\tau$ , 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 до Кулону:

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

де  $\tau_0$  – міцність на зрушення, що залежить від зчеплення;  $\mu \cdot \sigma$  – міцність, що обумовлена звичайним тертям з коефіцієнтом внутрішнього тертя  $\mu$ .

Б. В. Дерягін [18] вважає, що для сухих сипких тіл з повітряними проміжками між частинками,  $\tau_0$  може прийматися рівною нулю, за винятком високодисперсних сипучих тіл. Однак, це положення не відповідає дослідним даним. Наприклад у [19] на підставі дослідних даних, отриманих при визначенні опору зсуву по методу Е. Дженіке [20, 21] (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, кг/см<sup>2</sup>, тобто це розмірність дотичного напруження.

Таким чином, уточнюється, 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 напруг [22–24] 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 у роботах [24, 25], 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 в роботах [26, 27], аналіз якої буде наведено нижче.

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 [28], Г. І. Дерсевича, [29] П. Н. Платонова [30, 31]. 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 вважалось, 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  $F_{III}$ , яка повинна бути більше початкової сили тертя  $F_{III}$ . 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 наведено 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, як буде показано в розд. 2, 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.

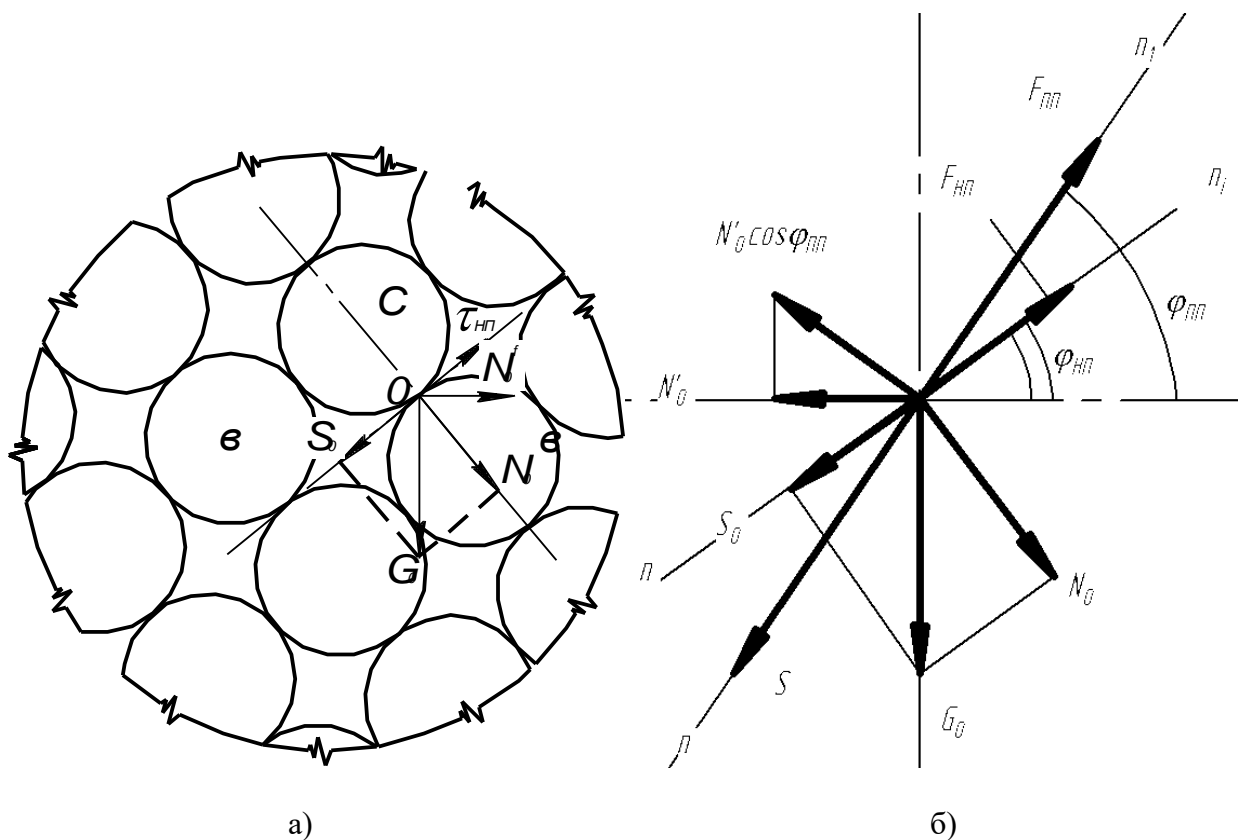


Рисунок 1.1 – Сили в контактi частинок сипкого середовища

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 [31], за результатами численних експериментів, встановив, що сила внутрішнього тертя більша за силу тертя, що визначається кутом тертя  $\varphi_{HH}$ , 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:

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

де  $\phi = \pi/2 - \phi_{III}$  – 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;  $\alpha$  – 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 [32], користуючись методами статистичної механіки, отримав формулу для кута внутрішнього тертя сипкого тіла при деформаційній зміні форми укладки у вигляді:

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

де  $R$  – число, що характеризує розподіл напружень і деформацій сипкого тіла;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання зерна по зерну;  $\nu$  – відношення числа контактів ковзання до загальної кількості контактів, що припадають в середньому на одне зерно.

Це відношення залежить від загального числа контактів  $n$ :

$$\nu = 1,5 - \frac{6}{n}; \quad 4 < n < 12.$$

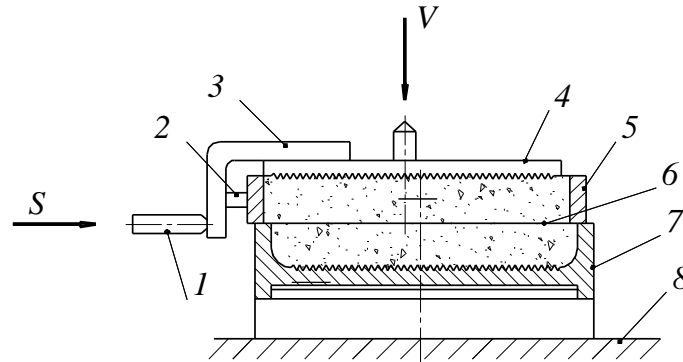
Фактично параметр характеризує щільність укладки в залежності від її структури. З формули випливає, що кут внутрішнього тертя сипкого тіла зростає зі збільшенням щільності, яка визначається параметром  $\nu$ . Як буде показано в розд. 2.1, опір зрушенню не визначається тертям ковзання зерен, а число  $R$  не повинно залежити від щільності укладки зерен. Формули Н. Платонова [31] і М. Бернштейна [32] 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. Дженике. 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. Дженике, котрий стандартизовано (ASTM J 6128-97). На рис. 1.2 наведено схему 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  $\sigma$ , від ущільнюючого навантаження, і відповідно  $\tau$  складе:

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

де  $A$  – площа поперечного перерізу зсувного шару.



1 – стрижень, що передає зсувне зусилля; 2 – навантажувальний шток; 3 – кронштейн; 4 – кришка; 5 – кільце; 6 – площина зсуву (площею контакту  $A$ ); 7 – корпус; 8 – рама

Рисунок 1.2 – Прилад для вимірювання опору зрушенню

На рис. 1.3 наведено залежності  $\tau = \sigma \cdot f_g \cdot \varphi$  та  $F_t = \tau \cdot A$ . Лінію функцій  $\tau$  Е. Дженіке називають межею текучості сипкого шару (ПТ), а лінію функції  $F_t$  – функцією витікання (ФИ). Всі точки значень зусиль, що лежать вище лінії ФИ приведуть до витікання, а в точках лежачих нижче – зсув і витікання відсутні. Кут нахилу  $\varphi$  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 природнього 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.

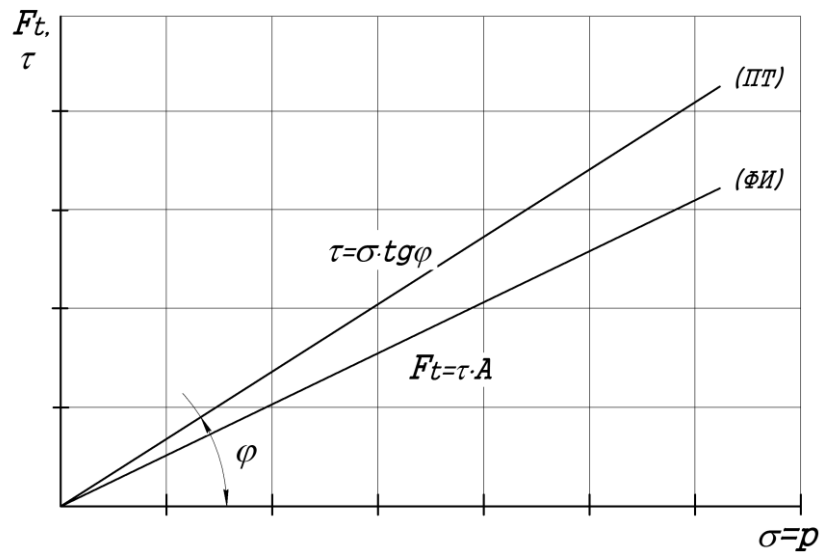


Рисунок 1.3 – Лінії граничних дотичних напружень (ПТ) та граничних сил зсуву (ФН)

Важливий внесок у дослідження фізичного процесу зсуву сипких матеріалів вніс Д. Тейлор. Дослідження Д. Тейлора узагальнено у роботі [33]. 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 напруг 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 напруг є умовними і часто емпіричними. При цьому не можна встановити можливу точність, що являється одним з серйозних недоліків застосування теорії пружності.

Однак, опір ковзання в сипких незв'язних матеріалах в будь-якій площині залежить від нормального тиску в даній площі і ефективного кута внутрішнього тертя, позначеного як  $\Phi$ . 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 (скочування). Ефективний кут внутрішнього тертя більше кута природного укоса, який по суті, окремий випадок першого, внаслідок різних умов рівноваги частинок в насипу. Як і Дженіке, Тейлор вважає, що силу зсуву можна визначити як:

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

де  $P_n$  – сила, що діє у нормальному до площини напрямку.

Кут внутрішнього тертя  $\Phi$  залежить від зчеплення частинок, від щільності скелету шару, а також від нормального тиску. Надалі експериментально автор встановив, що при зсуві кут внутрішнього тертя  $\Phi$  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 зчепленні частинок, що фактично відповідає опорі збільшення обсягу.

Те, що опір зрушенню відбувається і за рахунок перекочуванню частинок в зачепленні, тобто за рахунок тертя кочення, було підтверджено Г. З. Фіалков [34, 35]. 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 повертатися, прагнучи 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 [36], 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  $\Phi$  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.

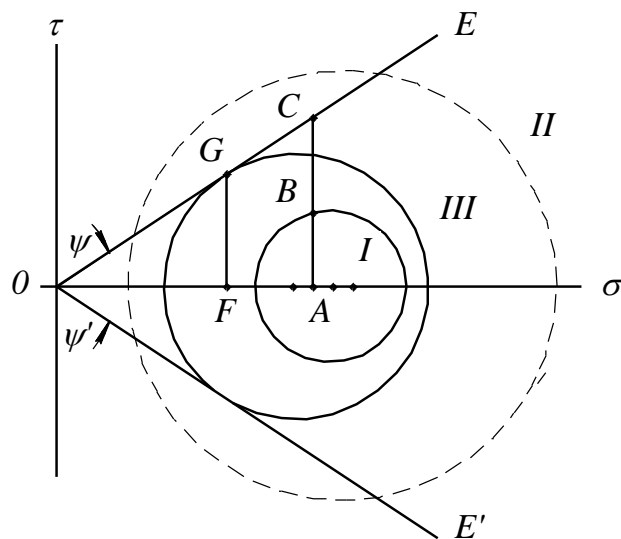


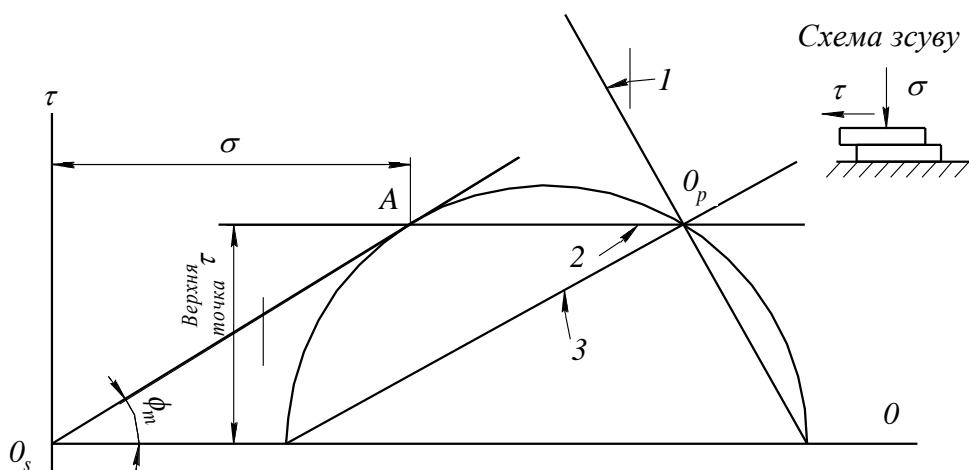
Рисунок 1.4 – Графічна схема теорії міцності Мора

Якщо напруження в даній точці зразка пісчаного 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 зсувне напруженням, відповідним кругу Мора III, так як ці напруження перевищують міцність на зсув.

Граничні лінії дотичні до кола III в точці G. У площині нормального напруження  $OF$  величина сколювального 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. При випробуванні на прямий зсув (див. рис. 1.5) діаграма Мора (по Тейлору) має такий вигляд. Величини дотичних напружень  $\tau$  і нормальних напружень  $\sigma$  діють в площині зсуву і представлені точкою А. При цьому максимальне відхилення кута  $\Phi_t$  з'явиться в площині зсуву. Таким чином, лінія, що з'єднує точку А з початком координат, повинна бути дотичною кола Мора. В цьому випадку горизонтальною є не площина максимального нормального напруження, а площина зсуву. Початок площ головних мінімальних та максимальних напруг (точка  $O_p$ ), знаходиться на перетині горизонтальної лінії з колом Мора.



1, 3 – головні площини; 2 – площина зсуву

Рисунок 1.5 – Коло Мора в момент зсуву при експериментах на прямий зсув

Переходячи до аналізу результатів роботи [67] визначено, що для зв'язних сипких матеріалів (різні види ґрунтів та ін.) на діаграмі Мора має бути

додано напруження зв'язку, що збільшує опір зсуву. При цьому початок координат зміщується вліво на величину цього напруження. Метою роботи було створення теоретичного визначення лінії межі текучості і, відповідно, критерію зсуву для зв'язних матеріалів. Аналіз цієї роботи становить інтерес з точки зору можливості використання отриманих залежностей для їх модифікації щодо зернових незв'язних матеріалів. Шляхом застосування системного аналізу, при якому сипкий матеріал розглядається, як система понять, що охоплюють всі умови зсуву. Геометрична побудова ліній границі текучості (ЛГТ) для дрібнодисперсних сипких матеріалів при постійних внутрішніх і зовнішніх параметрах системи полягає в знаходженні огибаючих дотичних кругових діаграм напружень в точках найбільшого відхилення вектора зсувних напружень –  $\tau_n$ , від вектора повних напружень  $\sigma_n$  (рис. 1.6).

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  $\tau_n$  – зрушуюче дотичне напруження;  $\sigma_n$  – нормальне напруження у площині зсуву;  $T_n$  – питомий опір на розрив від початкового питомого опору зсуву  $\tau_{on}$ .

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  $n_s = 1...6$ . Чим його величина більше, тим матеріал має кращу здатність до витікання.

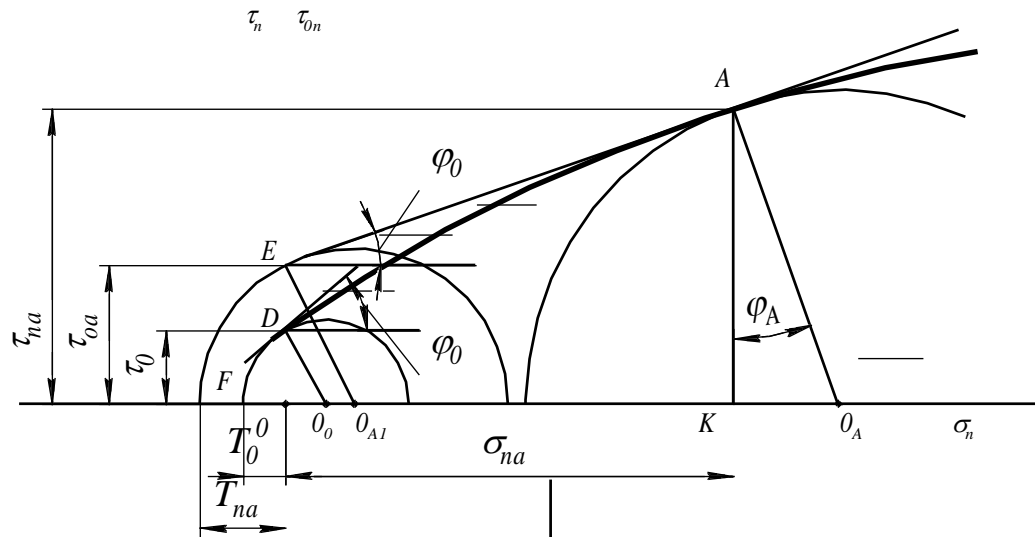


Рисунок 1.6 – Графічна побудова ліній межі плинності сипких матеріалів (СМ)

Автор у роботі [37] вважає, 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  $\sigma_n$ .

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

де  $f_n$  – коефіцієнт внутрішнього тертя на поверхні зсуву.

Сипкий матеріал, має більшу величину  $K_s$  та являється більш сипким, тобто більш схильним 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 матеріалах 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.

## 1.2 Огляд робіт, з 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.

Г. І. Креймерман [38] одним з перших досліджував завантаження ковшів. 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 [39, 40].

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 об'єми (0,6...1,95 л.). Кількість ковшів на 1 м

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. Це досягалося конструкцією завантажувального лотка з вертикальною задньою стінкою, основа якої сполучалася з напівкруглим днищем бункера на рівні горизонтальній осі направляючого барабана. (рис. 1.7).

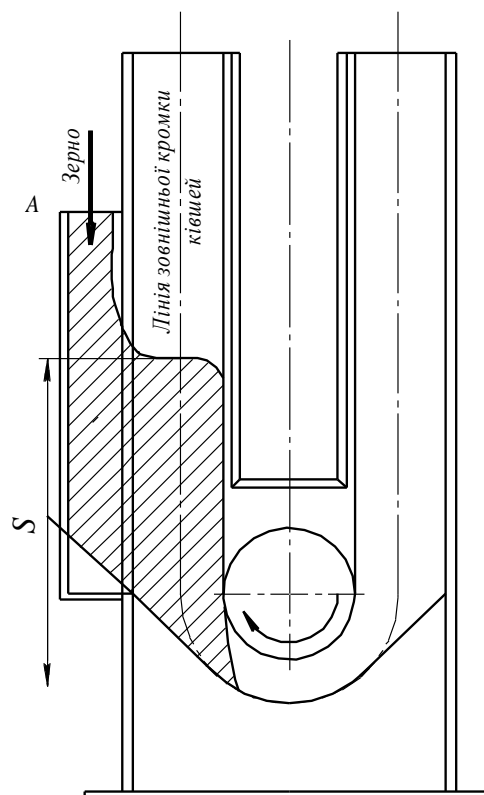


Рисунок 1.7 – Схема ефективного заповнення ковшів за Г. І. Креймерманом

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:

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

де  $q$  – геометричний об'єм ковша;  $\phi$  – 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 (т.  $A$ ) повинна бути вище стовпа на 200...300 мм.

Під час випробувань проводилися вимірювання зворотного сипу на різних рівнях робочої труби. Відзначається, що значне розсіювання відбувається у верхній частині під час переходу ковша на барабан. Однак, дані про кількість зворотних висипань за різних умов випробування не надаються. Відзначається, що, незважаючи на утворення висипу на спині, можна досягти коефіцієнта наповнення ковша  $\phi = 0,8$  і вище. Слід відмітити, що, як було встановлено у подальшому [43], утворення зворотного сипу призводить до значного пошкодження зерна. Що стосується використання високих швидкостей робочого органу, то зазначається, що при їх збільшенні вище 5 м/с, починається різке збільшення потужності, і що від таких швидкостей слід відмовитися. Крім того, на високих швидкостях відбувається значне пошкодження зерна та утворення вибухонебезпечної пилу.

Необхідно зазначити, що позитивним результатом роботи є встановлення того факту, що при раціональному виборі конструкції та кінематичних параметрів можна забезпечити високу ефективність завантаження ковшів. Але запропонований автором спосіб завантаження має істотний недолі: він вимагає значної висоти лотка і, відповідно, бункера.

В сучасних норіях завантажувальні лотки мають більш раціональну форму з похилим дном, що дозволяє збільшити швидкість наповнення ковшів, але розраховані залежності для параметрів, що забезпечують ефективність завантаження, поки що відсутні.

В роботі [39] 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 автор у роботі [44]. Він вважає, що в цьому випадку зусилля розтягування на стрічці вище, 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 ходу, то автор вважає, що навантаження на стрічку і на кріплення ковшів менші, ніж при навантаженні по ходу.

В наведених роботах не приводиться обґрунтування фізичної сутності процесів, відсутні теоретичні передумови для вибору конструктивно-кінематичних параметрів завантаження та наповнення ковшів з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу.

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

З'ясуванню можливої причини цього явища була присвячена робота Г. Н. Ламкіна [45]. 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 (рис. 1.8, а). Для усунення або мінімізації цього явища пропонується встановити додаткову вертикальний лоток шириною  $l_{\text{л}}$  (рис. 1.8, б). 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:

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

де  $h_{\text{з}}'$  – висота відкриття заслінки впускного отвору (фактично висота потоку);  $\alpha$  – кут нахилу дна лотка;  $\beta$  – кут викидання щодо лінії руху крайки ковша.

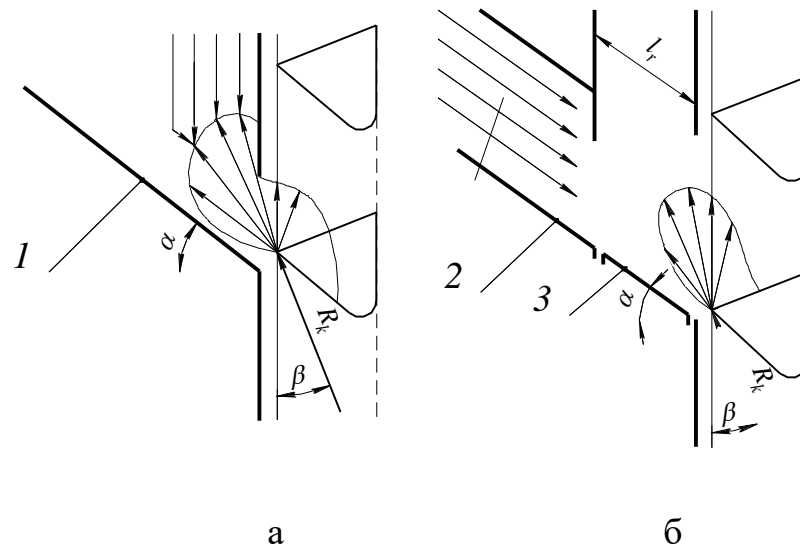


Рисунок 1.8 – Схема відштовкуючої дії ковшів на живлячий потік в живлячій ємності без лотка (а) та при проміжному лотку (б)

Автор склав систему емпіричних рівнянь [46], пошарового заповнення ковша з урахуванням опору надходженню матеріалу в ківш, рішення якого дозволяє визначити  $g_{ejx}$  – швидкість витікання любого шару зерна  $e$ , при любому положенні ковша  $j$  щодо потоку. Тоді середня швидкість потоку зерна, що надходить до ковша, визначається як:

$$g_n = \frac{\sum g_{ejx}}{a + h_{\text{з}}} \Delta h_{\text{з}}, \quad (1.14)$$

де  $h_{\text{з}}$  – товщина потоку;  $\Delta h_{\text{з}}$  – товщина шару протока;  $a$  – параметр місця знаходження крайки ковша відносно виходу потоку.

Автор висловлює думку, що отримані вислови не претендують на

вичерпну повноту встановлення основних показників роботи норії. Про це свідчать отримані ним результати. Так за швидкості стрічки 2,5 м/с коефіцієнт заповнення склав  $\psi \approx 0,2$ , що не відповідає практичним даним. У порівнянні з результатами роботи [47] коефіцієнт заповнення засипанням повинен бути в межах  $\psi \approx 0,4$ , так як загальний коефіцієнт заповнення на цій швидкості  $\psi = 0,8$ , а коефіцієнт зачерпування в бункері  $\psi = 0,4$ . Похибка схеми автора полягає в тому, що, як буде показано далі в розд. 3, потік зерна надходить до ковша всією масою безпосередньо перед наближенням до краю, а зачерпуюча крайка ковша лише відсікає його наповнюючу частину.

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 [48] 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. Його дослідження продовжено у роботах [49, 50]. 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 [51, 52] 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;  $q = \frac{П}{3,6 \cdot g}$  – поточне навантаження на стрічці;  $П$  – продуктивність норії (т/год).

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

В роботі [53] вказується, що для сільськогосподарських вантажів значення  $K_{зач} = 2 – 5$  залежить в основному від фізико-механічних властивостей. В довіднику [50] 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. В. Боймером і Н. Вемайером в роботі [51] було здійснено спробу 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, які будуть розглянуті в подальшому огляді.

Останніми роботами, присвяченими теоретичному і експериментальному дослідженню опору черпання сипких матеріалів норійними ковшами є роботи В. Я. Готліба [52]. Розглядалась модель, згідно якої рухаючись відносно центра обертання, ківш вривається 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 ковш. Сили зчеплення призми з насипом не враховувались, оскільки вважались незначно малими. Контур ковзної лінії і відповідно, форму призми визначали двома способами. При першому способі було використано графоаналітичний метод теорії пружності за С. С.Голушкевичем що наведений у роботі [54]. 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). Система характеристичних кіл побудована для сипкого середовища з кутом внутрішнього тертя  $\rho = 30^\circ$  (рис. 1.9, а). Хорда  $A'D'$  кола вершин (рис. 1.9, б) зображує площину  $AD$  сипкого середовища, на котре і буде діяти пасивний тиск. Площа  $AD$  являється лінією стикання призми випирання і масиву матеріалу в ковші. Згідно попередньому аналізу, рівнодіюча сил тиску  $P$  прикладена і діє під кутом  $\rho/3$  до нормалі к площині  $AD$ . Визначивши силу  $P$  шляхом побудови багатокутника сил для кожного положення ковша і точки її прикладення, отримано момент опору відносно осі обертання.

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.

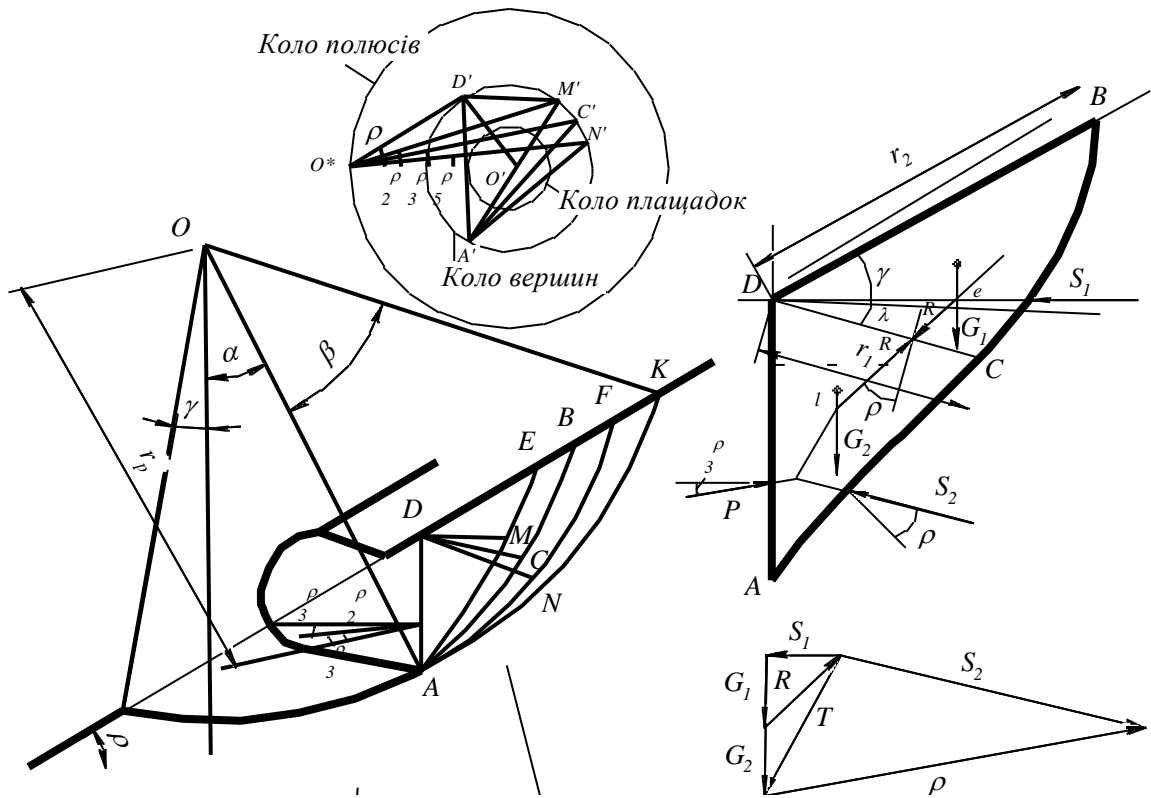
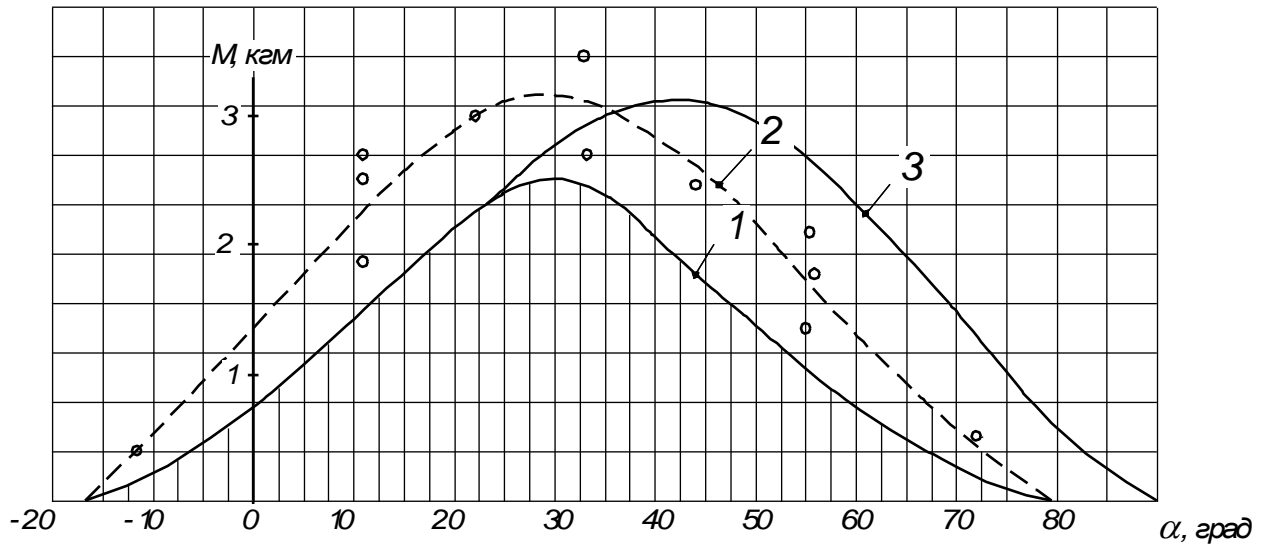


Рисунок 1.9 – Графоаналітичний метод визначення сили опору при зачерпуванні з насипу

На рис. 1.10 наведено залежності зміни опору від кута повороту ковша.



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

Рисунок 1.10 – Зміни обертаючого моменту в залежності від кута повороту

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.

Питома робота зачерпування визначалась як:

$$A_{y\partial} = \frac{F_1 \cdot K_1 \cdot K_2}{G}, \quad (1.16)$$

де  $F_1$  – площа (питома робота) під кривою 1;  $K_1$  – коефіцієнт, враховуючий тертя матеріалу о ківш;  $K_2$  – коефіцієнт, враховуючий тиск додаткових мас;  $G$  – вага матеріалу в ковші при його повному заповненні.

Приймаючи  $F_1 = 2 \text{ кГм}$ ,  $K_1 = 1,5$ ,  $K_2 = 1,6$  и  $G = 3,1 \text{ кг}$ , автор отримує  $A_{y\partial} = 1,55 \frac{\text{кГм}}{\text{кг}}$ . Експериментальне значення на ящику з піском, при швидкості 0,2 м/с склало:  $A_{y\partial\text{Э}} = 2 \frac{\text{кГм}}{\text{кг}}$ . У роботі Боймера-Вемайєра [51], при зачерпуванні питома робота склала  $A_{y\partial\text{Э}} = 1,8 \frac{\text{кГм}}{\text{кг}}$  (вочевидь при інших параметрах більш сухого піску).

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.

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. Цей факт підтверджено і в результаті лабораторних випробуваннях стійкості відкосів на основі визначення опору зсуву. Задача

розрахунку зводиться, до визначення розташування центру та радіусу критичної та найнебезпечнішої дуги ковзання. Зазвичай це досягається рядом послідовних наближень. 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. Умова стійкості всієї маси ґрунту виражається рівністю моментів сил зсуву та сил опору:

$$R \cdot \sum W_s = R \cdot \operatorname{tg} \Phi_\alpha \cdot \sum P_n + R \cdot c_\alpha \cdot L_\alpha, \quad (1.17)$$

де  $W_s$  – зсувна сила, що діє на кожен елемент;  $\Phi_\alpha$  – ефективний кут тертя;  $P_n$  – сила нормативного тиску кожного елемента;  $c_\alpha$  – коефіцієнт питомого зчеплення;  $L_\alpha$  – довжина дуги ковзання;  $R$  – радіус центра обертання.

У цьому виразі сили опору приймаються відповідно до закону Кулона, як уже зазначалося раніш Е. Дженіке, згідно з яким опір руху оцінюється за допомогою єдиного, так званого, ефективного коефіцієнту тертя. Цей коефіцієнт відображає одночасно, як вплив тертя, так і зчеплення часток. Відмінною особливістю використання В. Готлібом метода вертикальних елементів являється те, що положення кожного елемента визначається кутом  $\varphi$ , який відлічується у напрямку обертання ковша від радіуса, проведеного від центра кругло циліндричної поверхні ковзання через зовнішню крайку ковша.

Крім того, при зачерпуванні враховується сила тиску на бокові грані елемента  $P$  і  $P + dP$ , направленої під кутом  $\psi$  до горизонту. Кут  $\psi$  визначався експериментально і приймався рівним  $\psi = \rho/3$ . На елемент також діє сила ваги  $dq$  і реакція  $ds$ , лежачого нижче матеріалу, котра відхиляється від нормалі до поверхні на кут тертя  $\rho$ . Сили опору від зсуву, як і при першому способі не враховуються.



Прийнято також, на основі результатів попереднього експерименту на ящику з піском, що центр круглоциліндричної поверхні лежить на радіусі, проведеного від центру обертання ковша по нормалі до лінії природного укусу.

Диференціальне рівняння рівноваги елемента визначається як:

$$dP = dq \cdot \cos \psi \cdot [tg \psi + tg(\alpha - (\phi + \rho - \psi))], \quad (1.18)$$

де  $\beta$  – кут, складений радіусом круглоциліндричної поверхні, проведений через зовнішню крайку ковша з вертикаллю.

Сила тиску масиву всієї призми випирання на ківш елеватора буде визначатися як:

$$P = \int_0^{\beta} dP = \gamma \cdot m \cdot r^2 \cdot (M + N) \cos \psi, \quad (1.19)$$

де  $\beta$  – центральний кут, що відповідає дузі ковзання призми випирання;  $M$  і  $N$  – параметри, визначаються комплексною сумою тригонометричних функцій різних комбінацій, вказаних вище кутів:

$$m = \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos \rho}.$$

Радіус  $r$  круглоциліндричної поверхні ковзання визначається як:

$$r = \frac{a}{1 + K \cdot \sin \beta_0 - \cos \beta_0},$$

де  $a$  – величина заглиблення ковша в матеріал;  $\beta_0 = \pi/2 + \phi - \rho + \alpha$  – отриманий в ряді послідовних спроб, починаючи від мінімального значення  $P$ ;  $K = G \cdot g(\alpha - \rho)$ .

На закінчення автор зазначає, що значення  $P$  при розрахунках з урахуванням круглоциліндричної поверхні відрізняють від розрахунку по методу С. С. Голушкевича у межах 5%. Тому більша похибка порівняно з експериментальними даними залишається не змінною. Оскільки дослідження

проводилися на низьких швидкостях 0,2 м/с вплив від даних зачерпування не враховувався.

### 1.3 Висновки по розділу та завдання дослідження

Узагальненням результатів відомих досліджень встановлено, що напрямок дисертаційної роботи, який передбачає обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій з метою забезпечення їх ефективної роботи, має певний науково-практичний сенс.

1. Встановлено, що 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. Відомі 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 забезпечити.

3. Недостатньо досліджено причини можливого утворення заторів у завантажувальних лотках та раціональні конструктивні засоби, що запобігають їх утворенню.

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.

Враховуючи вище наведені висновки були поставлені наступні завдання:

– виконати аналітичне дослідження пружності зернового шару та його

опору внутрішньому зсуву;

– провести аналітичне дослідження процесів заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу, завантажені проти ходу та по ходу тягового елемента;

– теоретично дослідити опір зачерпуванню при різних режимах роботи норії;

– експериментально визначити коефіцієнт опору зсуву двома способами: за параметрами осесиметричного укусу та прямим зсувом;

– експериментально визначити коефіцієнт тертя зернового матеріалу пластиковими та сталевими поверхнями;

– визначити умови та параметри лавиноподібного руху шару зернового матеріалу по нахиленій поверхні розробленим експериментальним пристроєм.

## РОЗДІЛ 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 [1, 4, 54, 55], 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. У зв'язку з цим, можна припустити, що опір зсуву зернових незв'язних матеріалів також зв'язаний з пружно-деформованим станом шару та, в якійсь мірі, з дією сил тертя. При цьому пружно-деформований стан шару, що знаходиться під дією ущільнюючого тиску, повинен залежати від характеру упаковки зернин у шарі.

#### 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. 2.1, а) та ромбоєдрична (рис. 2.1, б) укладка. Перший має більшу пористість (порозність) та вважається пухкою, другий – з меншою пористістю вважається щільною. Щільним вважається і тетраєдричне укладання, у якому геометрія укладання збігається з ромбоєдричною в поперечному перерізі [3].

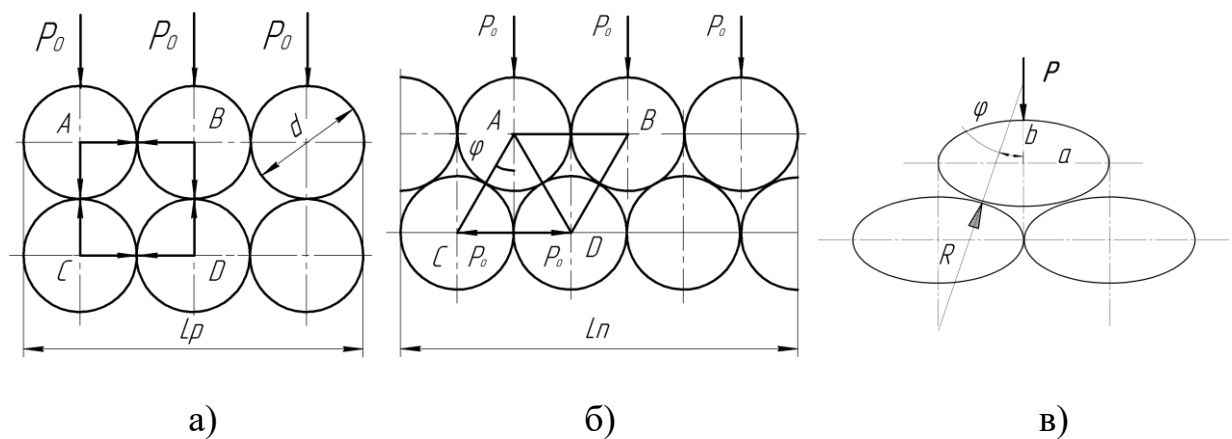


Рисунок 2.1 – Розподіл сил тиску при зсуві

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 [5].

Розглянемо силову взаємодію між частинками в граничному стані, приймаючи їх абсолютно жорсткими (рис. 2.1, б). На верхні елементи поверхні будуть діяти сили тиску  $P_0$ , а на контактуючу з ними нижні частинки – їх ортогональна складова  $P'_0 = P_0 \operatorname{tg} \varphi$ , де  $\varphi$  – кут тиску. На кожну нижню частинку будуть діяти дві складові  $P'_0$ , ріні за величиною і протилежні за напрямком. В

результаті, при відсутності зсувного зусилля система буде перебувати в рівновазі. Тангенс кута  $\phi$  являється кутовою деформацією шару  $Y$ .

Аналогічно будуть діяти і парні дотичні напруження:

$$\tau = p \cdot \operatorname{tg} \phi = p \cdot Y,$$

де  $p$  – тиск на одну частинку.

У зерен сільськогосподарських культур еліпсоїдної форми розміри півосей мають співвідношення  $b \approx \frac{1}{2}a$  незалежно від об'єму, а кутова деформація буде такою же, як і у сферичних зерен (рис. 2.1, а; в), тобто дорівнювати:

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

Як було показано вище, при ущільнюючому тиску зміна об'єму супроводжується відповідно зміною форми укладання [8–11]. Застосовуючи методи теорії пружності для зернового шару, як дискретного середовища, тензор деформації зсуву можна уявити, як суму двох складових:

$$T_\varepsilon = T_\varepsilon^0 + D_e, \quad (2.1)$$

де  $T_\varepsilon^0$  – шаровий тензор деформації, котрий відповідає деформації об'єму без змін форми;  $D_e$  – 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 (2.1) в матричній формі має вигляд:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}Y_{yx} & 0 \\ \frac{1}{2}Y_{xy} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon^* & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \varepsilon_x - \varepsilon^* & \frac{1}{2}Y_{yx} & 0 \\ \frac{1}{2}Y_{xy} & \varepsilon_y - \varepsilon^* & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.2)$$

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

Використовуючи для спрощення запису дельта – символ Кронекера  $\delta_{ij}$ , рівняння (2.2) приймає вигляд:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon^* \cdot \delta_{ij} + \frac{1}{2} \cdot Y_{ij}. \quad (2.3)$$

Оскільки зміни об'єму та форми відбуваються одночасно, то  $\varepsilon^*$  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  $\varepsilon^*$  і  $Y$  можна представити у вигляді:

$$\varepsilon^* = 2 \cdot \lambda \cdot Y^2, \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – 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:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -p & 0 & 0 \\ 0 & -p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\sigma_x + p & \tau_{yx} & 0 \\ \tau_{xy} & -\sigma_y + p & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.5)$$

де  $p$  – тиск на шар;  $\tau$  – дотичні напруження, або:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \tau_{ij}. \quad (2.6)$$

Для знаходження дотичних напружень, визначаючих рівноважний стан, використаємо варіаційне рівняння Лагранжа [56]. В основу його покладено принцип, що сума віртуальних робіт зовнішніх і внутрішніх сил дорівнює нулю. У нашому випадку ця умова має вигляд:

$$w_{ij} = -p \cdot \delta\varepsilon + \tau_{ij} \cdot \delta Y_{ij} = \left( \tau_{ij} - p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} \right) \cdot \delta Y_{ij} = 0, \quad (2.7)$$

де  $w_{ij}$  – сума віртуальних робіт від  $p$  і  $\tau$ ;  $\delta\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} \cdot \delta Y_{ij}$  – символ варіації,

що означає, що компоненти уявної деформації передбачається нескінченно малими.

У рівнянні (2.7) перший співмножник дорівнює нулю:

$$\tau_{ij} - p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}} = 0, \quad (2.8)$$

відповідно:

$$\tau_{ij} = p \frac{\partial \varepsilon^*}{\partial Y_{ij}}. \quad (2.9)$$

Враховуючі (2.4), отримаємо значення дотичного напруження:

$$\tau_{ij} = 2 \cdot p \cdot \lambda \cdot Y_{ij}. \quad (2.10)$$

Оскільки у дискретному шару  $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon^*$  та  $\sigma_x = \sigma_y = p$ , то у рівняннях (2.2) і (2.5) девіатори відповідають тензорам чистого зсуву  $\tau_{ij} = |\varepsilon|$  і  $Y_{ij} = |Y|$ . Відповідно значення дотичного напруження має вигляд:

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

Рівняння (2.10) для шару приймає вигляд:

$$\tau = 2 \cdot p \cdot \lambda \cdot Y. \quad (2.11)$$

З рівняння (2.11) випливає, що для ідеальних частинок при  $Y = 0,5$ :

$$\tau = p \cdot \lambda. \quad (2.12)$$

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  $\lambda$  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:

$$\lambda = Y \cdot \frac{1-n}{1-m}, \quad (2.13)$$

де  $n = 0,258$  – пористість тетраедричної щільної укладки;  $m = 0,476$  – пористість рихлої кубічної укладки [57].

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

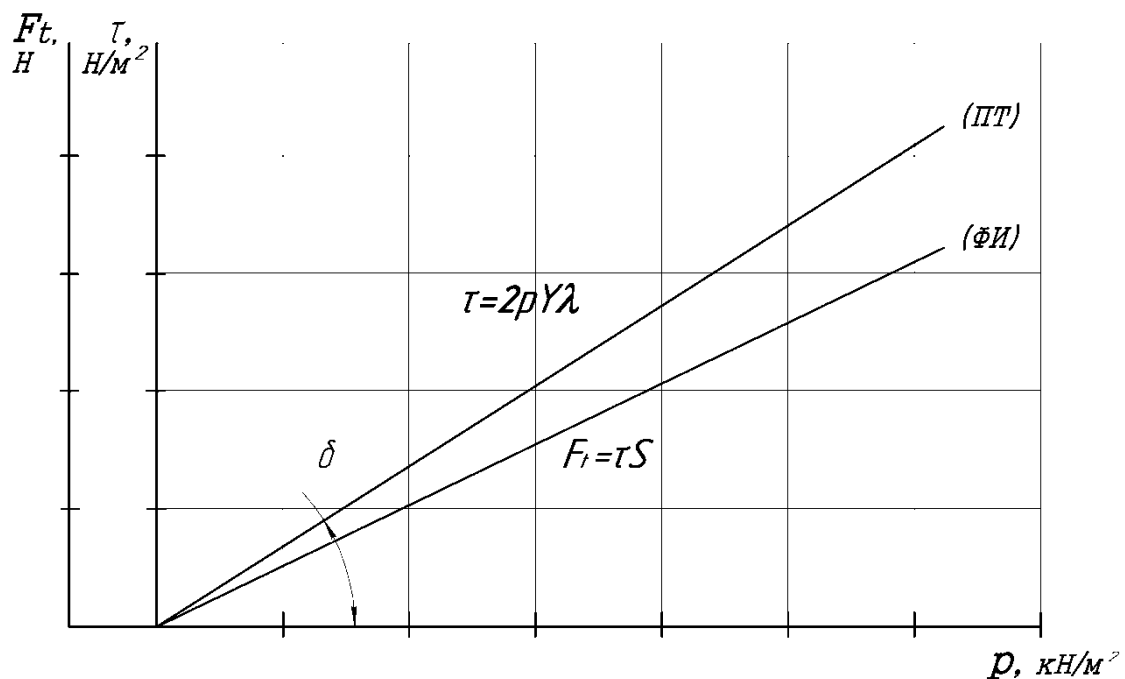


Рисунок 2.2 – Лінії граничних дотичних напружень (ПТ) та граничні сили зсуву (ФІ)

На рис. 2.2 наведено лінії граничні дотичні напружень  $\tau = p \cdot \lambda$  та лінії граничних сил зсуву:

$$F_t = \tau \cdot S ,$$

де  $S$  – площа основи шару;  $\delta$  – ефективний кут зсуву;  $p$  – ущільнюючий тиск;  $f_{\delta}$  – ефективний коефіцієнт внутрішнього тертя.

Лінію  $\tau = p \cdot f_{\delta}$  – 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 відсутнє. Таким чином те, що Е. Дженіке називає ефективним кутом внутрішнього тертя, являється ефективним кутом зсуву, а коефіцієнт  $f_{\delta}$  – ефективним коефіцієнтом зсуву, чи просто – коефіцієнтом зсуву, тобто  $\lambda$ .

Що стосується шару, що складається із зерен різних форми і розмірів, то ефективний коефіцієнт зсуву можна визначити, або експериментально за методом Е. Дженіке, або теоретично, як буде показано далі, шляхом аналізу напруженого стану осесиметричного укусу. Слід зазначити, цей метод не дозволяє визначити складові коефіцієнта зсуву  $\lambda$ .

Як зазначалося раніше, збільшення щільності відбувається за рахунок вклинювання часток шару, що в загальній теорії сипких матеріалів називають зачепленням часток. Таким чином, при зсуві часток шару необхідно долати як дотичні напруження, які є складовими ущільнюючого тиску внаслідок деформації зсуву, але і дотичні напруження, що виникають при опорі виходу часток із зачеплення.

Д. Тейлор в процесі експериментального дослідження опору зрушенню піску при тривісному стиску встановив, що опір зсуву, який витрачається на подолання сил зачеплення, становить 25% від загального опору. Ефективний коефіцієнт тертя (фактично зсуву) для піску склав 0,645. При цьому, частина цієї величини, що витрачається на тертя (насправді безпосередньо на подолання пружних сил) склала 0,475, а решта 0,170 – на подолання зачеплення або, як він вважає, на опір збільшенню обсягу. Відзначимо, що для

сухого піску в залежності від його крупності, кут укосу становить  $\delta = 29^\circ$ , який відповідає коефіцієнту внутрішнього тертя 0,5317 і 0,5343.

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. 2.3 наведено схему входу-виходу округлених частинок з зачеплення при зсуві. Опір зсуву утворюється в наслідок виникнення дотичних напружень  $\tau'$ , що виникають при контакті частинок в русі. В цьому випадку сумарне дотичне напруження буде дорівнювати:

$$\tau = \tau' + \tau'',$$

де  $\tau' = p \cdot \operatorname{tg} \varphi = p \cdot Y$ ;  $\tau'' = \tau_{TP} / \cos \varphi$ ;  $\tau_{TP}$  – дотичні напруження тертя кочення.

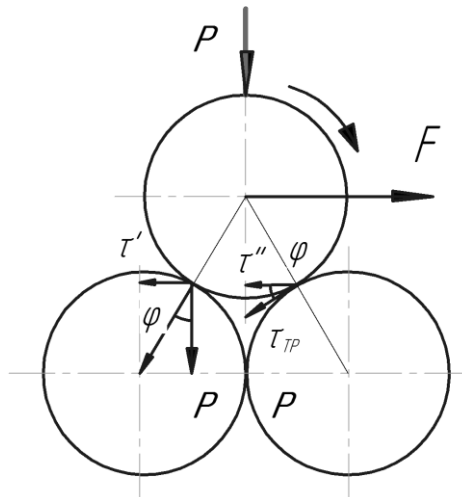


Рисунок 2.3 – Схема відтворення дотичних напружень при зсуві нового шару

В результаті отримуємо:

$$\tau = p \cdot Y + p \frac{\mu}{\cos \phi},$$

де  $p$  – тиск на частинку;  $Y$  – кутова деформація;  $\mu$  – коефіцієнт тертя перекочування або коефіцієнт опору виходу із зачеплення.

Остаточню:

$$\tau = p \cdot (Y + \mu),$$

де  $(Y + \mu) = \lambda$

або:

$$\mu = \lambda - Y. \quad (2.14)$$

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

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 [58].

При виході із зачеплення відбувається перекочування не тільки заокруглених частинок, але і не округлених частинок, що підтверджується в роботі [59], 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. В роботі [60] встановлено, що при кутах нахилу опорної площини, тангенс яких перевищує значення 0,3, рух потоку сипкого матеріалу носить лавиноподібний характер. При цьому відбувається збільшення виступу 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:

$$f^* = f_c + K \cdot \mu, \quad (2.15)$$

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:

$$h^* = h \cdot \frac{m}{n} \cdot (1 + f_c) \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (2.16)$$

де  $h$  – фактична висота для не лавиноподібного потоку;  $\theta$  – кут нахилу опорної площині.

Для не заокруглених частинок, наприклад частинок сухого піску, збільшення висоти може бути досить значним, і за даними роботи [61] може перевищувати висоту не лавиноподібного потоку в 2-3 рази в залежності від кута нахилу. Для заокруглених частинок збільшення висоти потоку буде меншим.

## 2.2 Визначення впливу опору зсуву зернових матеріалів на осесиметричному відкосі

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  $\lambda$ , або використовуючи метод Д. Тейлора, визначаючи всі параметри. Не дивлячись на уявну простоту методу Е. Дженіке, він досить складний і трудомісткий. 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 тензометричних,

спеціально виготовлених датчиків, у вигляді певного розміру пластин, з наклеєними тензорезисторами, і відповідної вимірювальної апаратури, 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. Складним є як сам процес вимірювання, так і математичний перерахунок, отриманих напружень і енергій.

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. 2.4, а). Відтворення укусу буде відбуватися під дією двох дотичних напружень (рис. 2.4, б).

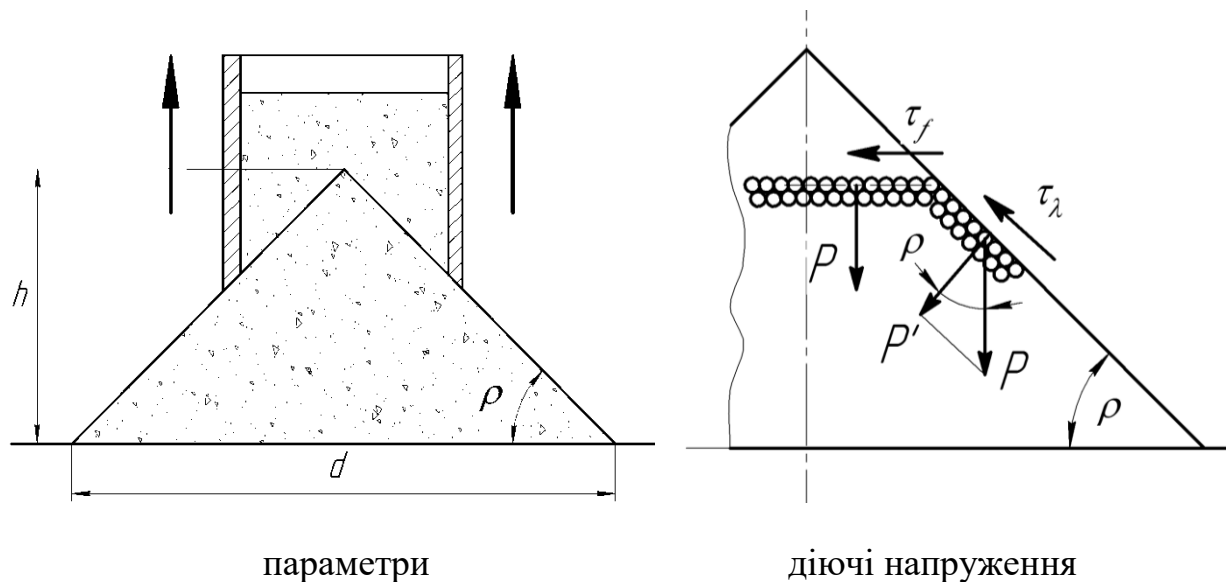


Рисунок 2.4 – Схема утворення вісесиметричного укусу:

Розширення укусу 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  $\rho$ .

Лавиноподібному обпаданню вниз шару будуть перешкоджати дотичні напруження зсуву, рівні відповідно до формули (2.11)  $\tau_\lambda = 2p \cdot Y \cdot \lambda$ .

Рівновага, утвореного укосу, буде визначатися умовою:

$$\tau_f = \tau_\lambda. \quad (2.17)$$

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

$$p \cdot f = 2p \cdot Y \cdot \lambda \cdot \cos \rho. \quad (2.18)$$

Звідки:

$$\lambda = \frac{f}{2Y \cdot \cos \rho}. \quad (2.19)$$

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

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

Згідно до (2.14) коефіцієнт  $\mu$  визначається як:

$$\mu = \lambda - Y.$$

Таким чином, необхідно вирішити питання визначення кутової деформації зсуву при реальних розмірах частинок шару. Порівняємо дані, отримані по залежності (2.14) і (2.19) 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 [62–64] для середнього за розмірами промитого піску  $\rho = 28^\circ 29'$ . Прийmemo  $\rho = 28^\circ 30'$ , при якому  $f = 0,543$ . При  $Y = 0,475$  за залежностями (2.19) і (2.14) отримаємо  $\lambda = 0,651$  та  $\mu = 0,176$ . Таким чином, залежності (2.19) і (2.14) 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:

$$Y = \frac{b_{cp} + c_{cp}}{2a_{cp}}. \quad (2.20)$$

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

У табл. 2.1 наведено мінімальні та максимальні розміри зерен сільськогосподарських культур [62, 64, 65].

Таблиця 2.1 – 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

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. 2.2).

Таблиця 2.2 – 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	0,520
		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	0,590
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	0,580
		соняшник	0,450

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 [12, 66, 67], обчисленням об'єму 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.

### 2.3 Висновки по розділу

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 упаковки 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 –  $0,450$ .

## РОЗДІЛ 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.

Таким чином, якість завантаження ковшів є найважливішим фактором забезпечення відповідної ефективності та стабільності роботи 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.

#### 3.1 Дослідження процесу заповнення ковшів при зачерпуванні з насипу

##### 3.1.1 Обґрунтування фізичної моделі процесу зачерпування

На підставі попереднього спостереження зачерпування матеріалу, розташованого в ящику з прозоро рими стінами; була прийнята наступна модель процесу зачерпуванні. При несталому режимі роботи, тобто при пуску, зачерпування відбувається з попередньо заповненого бункера, в якому

матеріал розташовується по лінії природного відкосу, незалежно від форми днища. 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 обсипається 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 закінчення слоїв матеріалу з ковша, що зменшує його заповнення. Закінчення 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 буде без опору зміщуватися щодо вище розміщеної пухкої частини матеріалу, яка обсипаючи буде підживлювати нижній шар.

У процесі руху виходить з ковша матеріал починає накопичуватися перед черпаючої кромки ковша і протягують уздовж каналу, а після виходу ковша з насипу викидається і зсипається вниз укосу.

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

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

Задачу руху 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. 3.1) [2, 6, 68, 69]. У

векторній формі рівняння руху частинки  $M$  під дією прикладених до неї сил можна записати як:

$$m\vec{a} = \vec{G} + \vec{N} + \vec{F}_{TP}, \quad (3.1)$$

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.

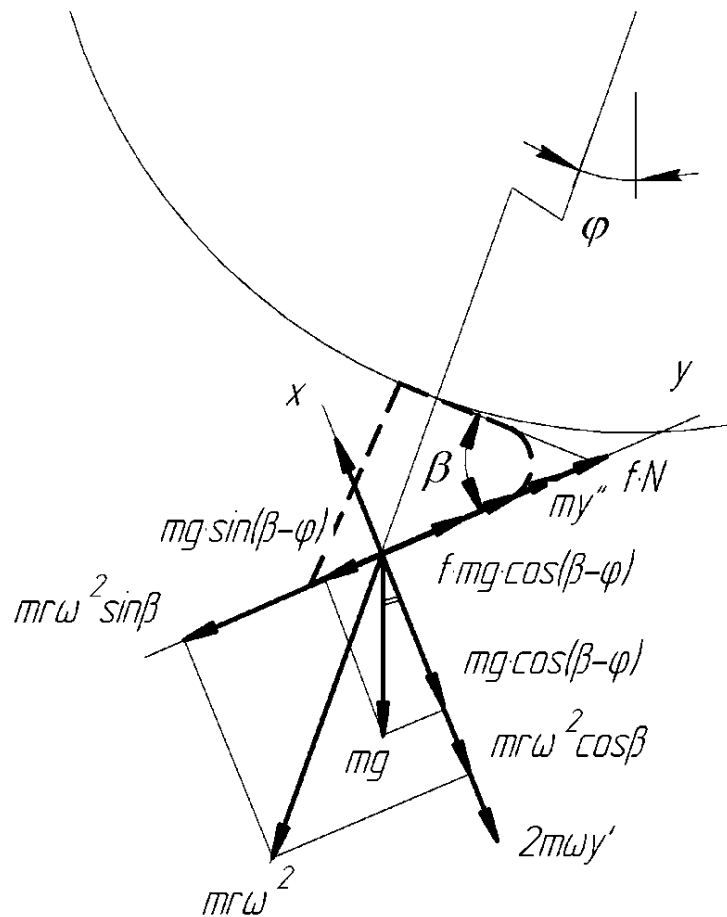


Рисунок 3.1 – Сили, діючі на частинку шару в ковші

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

$$\begin{aligned} \sum Y = 0: & m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta + m \cdot g \cdot \sin(\beta - \phi) - m \cdot y'' - N \cdot f = 0 \\ \sum X = 0: & N - m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \cos \beta + m \cdot g \cdot \cos(\beta - \phi) - 2 \cdot m \cdot \omega \cdot y' = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $m \cdot r \cdot \omega^2$  – центробіжна сила;  $m \cdot y''$  – сила інерції;  $2 \cdot m \cdot \omega \cdot y'$  ( $y' = \mathcal{G}_C$ ) –

сила Коріоліса;  $\beta$  – кут зачерпування ковша;  $\omega$  – кутова швидкість;  $\mathcal{G}_C$  – 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:

$$y'' + 2f \cdot \omega \cdot y' = r \cdot \omega^2 (\sin \beta - f \cos \beta) + g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]. \quad (3.3)$$

Рішення цього неоднорідного рівняння другого порядку має вигляд [21]:

$$y = y_1 + y_2, \quad (3.4)$$

де  $y_1$  – спільне рішення однорідного рівняння (3.3):

$$y_1 = C_1 e^{K_1 t} + C_2 e^{K_2 t}, \quad (3.5)$$

$y_2$  – часткове рішення неоднорідного рівняння (3.3):

$$y_2 = t^K e^{\alpha t} [p(t) \cos \beta \cdot t + q(t) \sin bt]. \quad (3.6)$$

Значення  $y_1$  визначаємо шляхом вирішення лінійного однорідного рівняння, відповідного рівняння (3.3):

$$y'' + 2f \cdot \omega \cdot y' = 0. \quad (3.7)$$

Характеристичним рівнянням для (3.7) буде:

$$K^2 + 2 \cdot f \cdot \omega \cdot K = 0. \quad (3.8)$$

Корні цього квадратного рівняння:

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

Тоді рівняння (3.5) приймає вигляд:

$$y_1 = C_1 + C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t}. \quad (3.9)$$

Значення  $y_2$  визначаємо з умови, що права частина неоднорідного рівняння (3.3) не містить множник  $e^{\alpha t}$ , а також не містить тригонометричних функцій з аргументом  $t$ , при цьому многочлени  $p(t)$  і  $q(t)$  має нульову ступінь. Отже,  $\alpha = \beta = 0$  і  $K = 1$ . Тоді  $y_2 = \Phi \cdot t$ , де  $\Phi$  постійний множник, який

визначаємо шляхом підстановки отриманого значення  $y_2$  в рівнянні (3.3) 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:

$$y_2 = \Phi \cdot t = \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \quad (3.10)$$

Рівняння (3.4) з підстановкою значень  $y_1$  та  $y_2$  приймають вигляд:

$$y = C_1 + C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \quad (3.11)$$

Перша похідна рівняння (3.11) дорівнює

$$y' = \frac{dy}{dt} = -2 \cdot f \cdot \omega \cdot C_2 \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{r \cdot \omega \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}. \quad (3.12)$$

Беручи початкові умови, згідно з якими при  $t = 0$   $y = y_0$ ,  $x' = 0$ ,  $y' = 0$  з рівнянь (3.11) та (3.12) 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 (3.11) приймає вигляд:

$$\begin{aligned} y = & y_0 - \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2} + \\ & + \frac{r \cdot (\sin \beta - f \cos \beta)}{4f^2} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{4f^2 \cdot \omega^2} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} t + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} t. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Швидкість ковзання частинки шару по стінці ковша дорівнює першій похідній шляху  $y$  по часу  $t$  отримаємо з рівняння (3.13):

$$\begin{aligned} g_c = \frac{dy}{dt} = & - \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega} \cdot e^{-2 \cdot f \cdot \omega t} + \\ & + \frac{r \cdot \omega (\sin \beta - f \cos \beta)}{2f} + \frac{g [\sin(\beta - \phi) - f \cos(\beta - \phi)]}{2f \cdot \omega}. \end{aligned} \quad (3.14)$$

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 (3.14) отримає вигляд:

$$g_c = \left[ \frac{r \cdot \omega \cdot \sin(\beta - \rho)}{2 \sin \rho} + \frac{g \cdot \sin(\beta - \phi - \rho)}{2 \cdot \omega \cdot \sin \rho} \right] \cdot (1 - e^{-2 \cdot f \cdot \omega t}), \quad (3.15)$$

де  $\omega \cdot t = \varphi$  – кут повороту ковша щодо вертикальної осі барабана;  $r = r_K$  – радіус ковша по зачерпувачій 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].

### 3.1.3 Визначення товщини витисненого шару 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.3.2) 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:

$$F^* = \gamma \cdot g \cdot L \cdot h' \cdot A \left\{ R_h \cdot \omega^2 (\sin \beta - f' \cos \beta) + g \left[ \sin(\beta - \phi) - f' \cos(\beta - \phi) \right] \right\}, (3.16)$$

де  $\gamma$  – об'ємна вага матеріалу;  $L = K \cdot B \cdot \sin \beta$  – довжина підстави шару (рис. 3.3);  $B$  – виліт ковша;  $\beta$  – кут зачерпування;  $A$  – ширина ковша;  $R_h$  – радіус центра ваги шару;  $\omega$  – кутова швидкість;  $h$  – товщина шару;  $f'$  – узагальнений коефіцієнт тертя;  $K = 1,15 \dots 1,2$  – коефіцієнт, враховуючий кривизну стінки.

Сила опору внаслідок зсуву верхньої частини шару щодо масиву дорівнюватиме:

$$F_c = \tau_{\text{ПР}} \cdot A \cdot L. (3.17)$$

З умови рівноваги отримаємо попереднє значення товщини шару:

$$h' = \frac{\tau_{\text{ПР}}}{\gamma \left\{ R_h \cdot \omega^2 (\sin \beta - f' \cos \beta) + g \left[ \sin(\beta - \phi) - f' \cos(\beta - \phi) \right] \right\}}. (3.18)$$

З формули (3.18) визначено, що величина  $h'$  буде функцією кута повороту  $\phi$ , у зв'язку з чим необхідно визначити початок відліку кута та

початковий об'єм  $V_0$  зачерпнутого матеріалу. На рис. 3.4 наведено схему зачерпування матеріалу з насипу з кутом природного відкосу  $\rho$ .

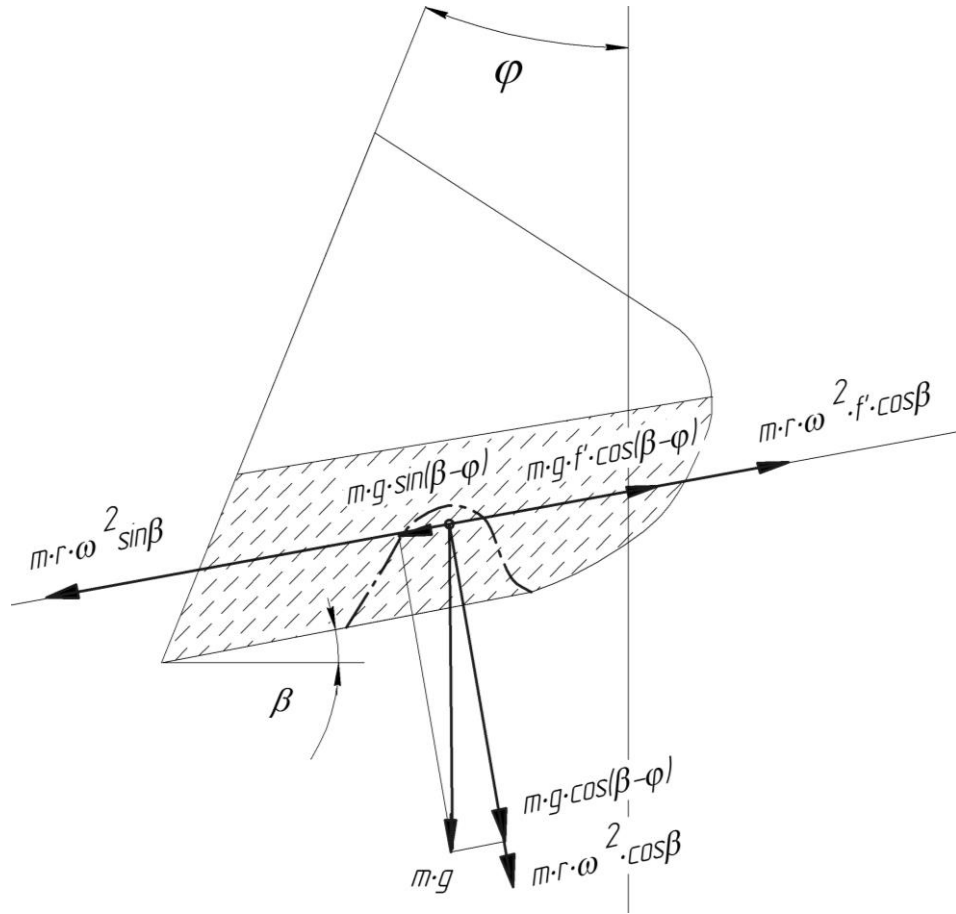


Рисунок 3.2 – Схема сил, що діють на шар

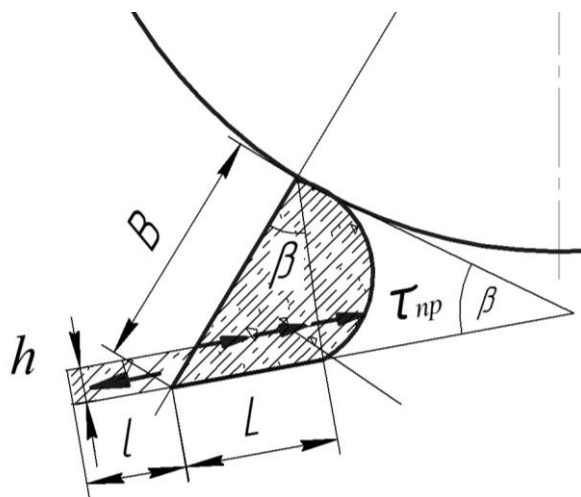


Рисунок 3.3 – Параметри шару, що витікає з ковша

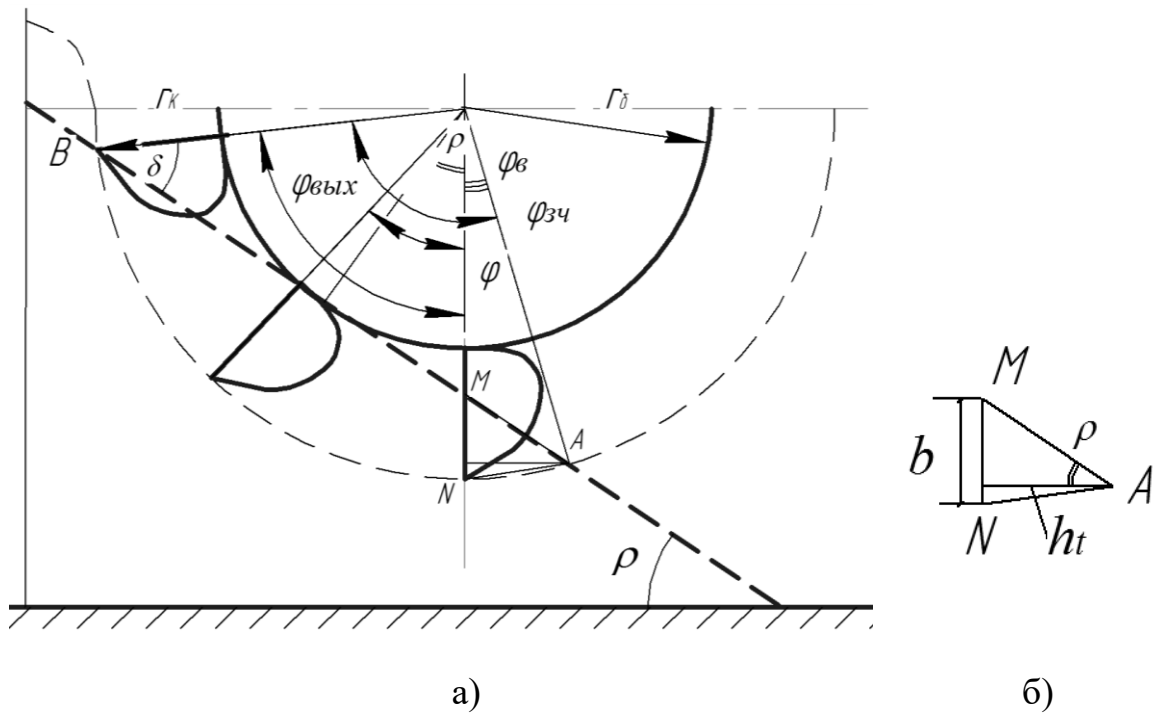


Рисунок 3.4 – Схема зачерпування матеріалу з насипу

Кут  $\rho$  визначимо з урахуванням зменшення кута відкосу в процесі русі зернового матеріалу і вібрації бункера:

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

де  $K = 0,7$  – загальноприйнятий мінімальний коефіцієнт зменшення тертя при русі;  $\rho_0$  – кут відкосу в стані спокою.

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

Кут зачерпування визначається:

$$\phi_{зч} = 2(90 - \delta),$$

де  $\delta = \arcsin \frac{r_B}{r_K}$ .

Кут виходу складатиме:

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

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

Зачерпуємий об'єм визначається бічною поверхнею трикутника AMN (рис. 3.3, б). Площа трикутника складатиме:

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

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

Зачерпуваний об'єм:

$$V_o = S \cdot A,$$

де  $A$  – ширина ковша.

За початок відліку поточного кута повороту  $\varphi$ , 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 (3.18), попереднє значення  $h'$  для кожного наступного кута, відрахованого від вертикальної осі.

Для визначення уточненого значення товщини шару спочатку необхідно визначити його початкове значення  $h_0$  по залежності (3.18) при  $\varphi=0$  і об'єму зерна в ковші  $V_0$ , приймаючи значення  $R_h$  рівним радіусу зачерпуваної кромці ковша. При цьому наведене дотичне напруження при зсуві частинок по всій товщині шару буде залежати від початкового тертя по стінці ковша і визначатися як:

$$\tau_{IP} = p_0 \frac{\lambda}{f_c'}, \quad (3.19)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт зсуву зернового шару для даного зернового матеріалу;  
 $f_c'$  – наведений коефіцієнт тертя ковзання.

$$p_0 = \frac{\gamma \cdot V_0 \cdot g \cdot \cos \beta}{A \cdot L}, \quad (3.20)$$

де  $\beta$  – 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 [7, 58, 70–72].

При витіканні шару по дну ковша узагальнений коефіцієнт тертя руху в залежності (3.19) і (3.20) необхідно обчислювати, як:

$$f' = K_g (f_c + \mu_k), \quad (3.21)$$

де  $K_g = (0,6 \dots 0,65)$  – коефіцієнт зменшення з урахуванням малої швидкості ковзання, відповідно до законів фізики тертя при малих питомих тисках [29].

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

$$h = h' \cdot \frac{Y}{\lambda}, \quad (3.22)$$

При визначенні товщини шару при заданому куті повороту нормальний ущілюючий тиск буде визначатися сумою тиску маси матеріалу в ковші  $p_M$  і тиск від дії центр обіжної сили  $p_{Ц}$ :

$$p_C = p_M + p_{Ц} \cdot \quad (3.23)$$

Відповідно:

$$p_M = \frac{\Delta V_{OCT} \cdot \gamma \cdot g \cdot \cos(\beta - \phi)}{A \cdot L}; \quad (3.24)$$

$$p_{Ц} = \frac{\Delta V_{OCT} \cdot \gamma \cdot R_M \cdot \omega^2 \cdot \cos \alpha}{A \cdot L}, \quad (3.25)$$

де  $R_M$  – радіус центра ваги маси зерна в ковші, в залежності від положення ковша;  $\Delta V_{OCT}$  – залишковий обсяг при попередньому положенні ковша.

Відповідно:

$$\tau_{ПР} = p_C \frac{\lambda}{f},$$

Графічний аналіз (рис. 3.5) показує, що кут тиску  $\alpha$  визначається положенням центра ваги основного масиву матеріалу в ковші і практично не змінюється при повороті ковша. Для ковшів типу EURO [73–75]:

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta L}{b},$$

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:

$$R_M = R_C + 2 \left( h_0 + \frac{h^*}{h_0} \right), \quad (3.26)$$

$$R_h = R_K - 2,5 \left( h_0 + \frac{h^*}{h_0} \right), \quad (3.27)$$

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.

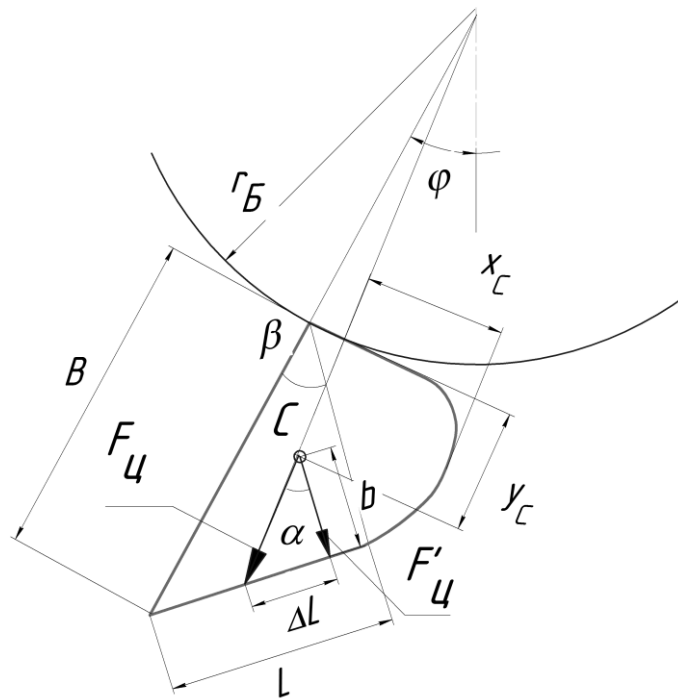


Рисунок 3.5 – Схема визначення кута тиску складової відцентрової сили

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

$$V_B = g_C \cdot \frac{\phi'}{\omega} \cdot h \cdot A, \quad (3.28)$$

де  $g_C$  – швидкість ковзання при заданому положенні ковша;  $\phi'$  – кутовий крок (на рад) ковшів при рівномірному розподілі заданій кількості ковшів на дузі  $\pi/2$ .

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

$$\Delta V_{ост} = \Delta V'_{ост} - V_B, \quad (3.29)$$

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

У процесі виходу зернового шару обсяг основного масиву матеріалу в ковші зменшується. При повороті на кут  $\phi > 45^\circ$  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 (3.18);  
 $h_p$  – 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:

$$h = \frac{V_{ост.п}}{L \cdot A}. \quad (3.30)$$

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

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

#### 3.1.4 Результати розрахунків процесу завантаження

У табл. 3.1 наведені параметри втрати обсягу в процесі зачерпування,  
 для норії продуктивністю 100 т/год при швидкості стрічки  $\mathcal{G}_л = 2,4$  м/с.  
 Значення параметрів отримані для пшениці вологістю  $W = 12.4\%$ , об'ємною  
 вагою  $800$  кг/м<sup>3</sup>. Розрахунок проводиться при зачерпуванні поліуретановим  
 ковшем типу SPS-280-18D HDP, параметри котрого склали: ширина  
 $A = 290$  мм, виліт  $B = 185$  мм, об'єм по водному рівню  $V_{z3} = 3,3$  л, повній  
 об'єм  $V_{z2} = 4,2$  л, кут зачерпування  $\beta = 40^\circ$ ,  $y_c = 74,1$  мм. Коефіцієнт тертя  
 пшениці по пластмасі  $f = 0.22$  [47], ефективний коефіцієнт зсуву склав  
 $\lambda = 0,686$ , коефіцієнт тертя кочення зерен  $\mu_k = 0,186$ .

Таблиця 3.1 – 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 $V_{Z2}$
$\varphi$	$v_c$	$h$	$V_{ВЫХ}$	$\Delta V_{ост}$	$\psi_{Z3}$	$\psi_{Z2}$
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. 3.6.

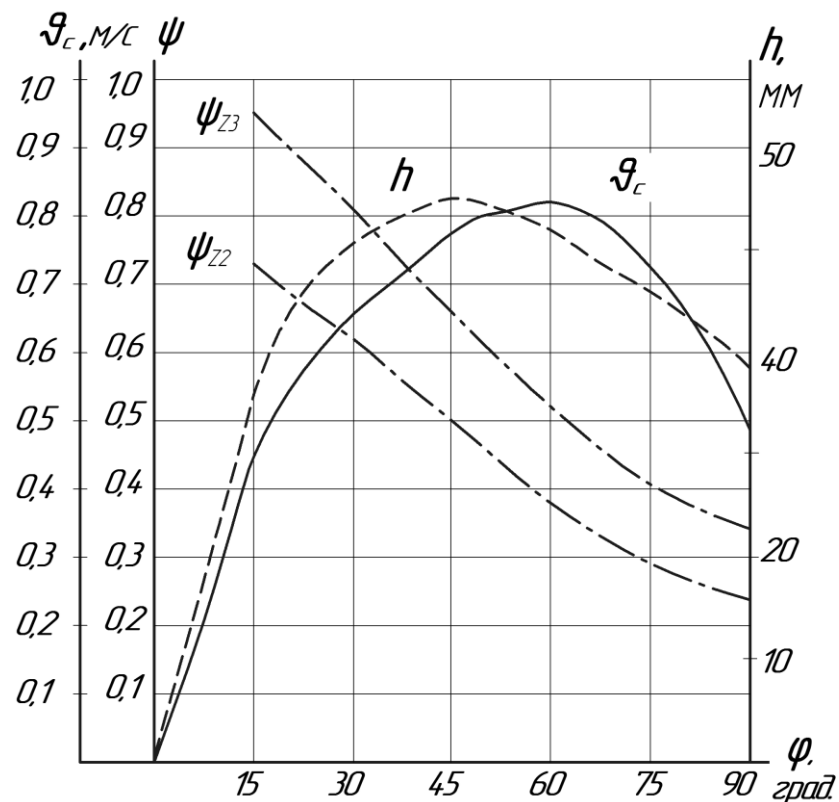


Рисунок 3.6 – Залежності швидкості витікання  $v_c$ , товщини шару  $h$ , коефіцієнту заповнення ковшів  $\psi_{Z3}$  від кута повороту барабана  $\varphi$  при зачерпуванні

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. 3.1) об'єм виходу матеріалу з ковша складатиме 2,149 л. При повному об'ємі початкового зачерпування  $V_{z2} = 4,2$  л. Остаточний обсяг в ковші складе  $\Delta V_{ост} = 4,2 - 2,149 = 2,051$  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 більший 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.

### 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, що наведені в розд. 1.2, а також робіт, присвячених дослідженню процесу розвантаження [14, 15, 76–78], дозволять визначити основні умови раціонального завантаження ковшів.

**Перша вимога** полягає в тому, що об'єм заповнення ковшів, отриманий зачерпуванні з насипу і подальшого досипання з живлячого лотка, не повинен бут більше об'єму ковша по водному рівню  $V_{z3}$ . 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 порушають процес досипання матеріалу у ковші.

### 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 [78–81] визначено, що характер закінчення залежить від співвідношення кута нахилу і кутів зовнішнього і внутрішнього тертя. При  $\rho_0 < \theta < \rho$ , де  $\rho$  і  $\rho_0$  – 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. У розд. 1 встановлено, що 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 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:

$$f^* = 0,8(f_c + f_k), \quad (3.31)$$

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  $f_k$  (3.31) 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 [60] присвяченій дослідженню закінчення сипкого матеріалу по спуску, біло 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. Лавина з скляних кульок була більш плавною, з меншим збільшенням висоти. В обох випадках лавина котилася стрімголов. Автори наводять гідродинамічну модель, що підтверджує відтворенню хвилі.

При кутах нахилу робочої поверхні лотка зазвичай  $45\text{--}60^\circ$ , 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.

Також необхідно враховувати той факт, що 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. 3.2.

Таблиця 3.2 – 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



з рівняння живих сил:

$$\frac{m\mathcal{G}^2}{2} - \frac{m\mathcal{G}_H^2}{2} = m \cdot g \cdot L \cdot \sin \theta - m \cdot g \cdot L \cdot f^* \cdot \cos \theta, \quad (3.32)$$

де  $L$  – довжина руху.

При верхній подачі матеріалу вираз для швидкості отримаємо у вигляді:

$$\mathcal{G}_H = \sqrt{\frac{2gH_1 \cdot (\sin \theta + f \cdot \cos \theta)}{\sin \theta} + K_0^2 \mathcal{G}_H^2} \quad (3.33)$$

де  $\mathcal{G}_H = \mathcal{G}_O \cdot K_\theta$  – початкова швидкість руху по лотку;  $\mathcal{G}_O = \sqrt{2gH_2}$  – швидкість падіння матеріалу з живильника;  $K_\theta$  – коефіцієнт зменшення швидкості  $\mathcal{G}_O$  (табл. 3.2.1),  $H_1 = H - H_2 = H - l \cdot \operatorname{tg} \theta$ .

Попередню висоту лотка можна визначити як:

$$H = \frac{\mathcal{G}_0^2 \cdot \sin \theta}{2g(\sin \theta - f \cdot \cos \theta)}, \quad (3.34)$$

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

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

$$h = \frac{Q_L}{\mathcal{G}_H \cdot A},$$



де  $Q_L = \frac{P \cdot 10^3}{3,6 \cdot \gamma}$  – витрата лотка ( $\text{м}^3/\text{с}$ );  $P$  – продуктивність норії ( $\text{т}/\text{год}$ );  
 $\gamma$  – насипна маса вантажу ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $A$  – 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:

$$h_{\max} = h \cdot \frac{m}{n} \cdot (1 + f_c) \cdot \text{tg} \theta, \quad (3.35)$$

де  $n$  – пористість щільної структури;  $m$  – пористість пухкої структури.

Допустима висота потоку визначається як:

$$[h_{\max}] = \sin \theta \left( t_K - \frac{\Delta}{\sin \beta} - \delta \cdot \text{tg} \theta \right) \cdot \cos \theta, \quad (3.36)$$

де  $\Delta$  – заданий зазор між потоком і стінкою ковша при заданому куті черпання  $\beta$ ;  $\delta$  – рекомендований (необхідний) параметр входу потоку в ківш (рис. 3.6)  $\delta = (0,2 - 0,25)B$ , де  $B$  – виліт ковша.

Щоб виключити науково-технічний прогрес ковшів необхідно визначитися з їх остаточною кількістю на 1 м довжини стрічки. 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:

$$n'_K = \frac{P \cdot 10^3}{3,6 \cdot \mathcal{G}_L \cdot V_{Z3} \cdot \gamma}, \quad (3.37)$$

де  $P$  – продуктивність,  $\text{т}/\text{год}$ ;  $\mathcal{G}_L$  – швидкість стрічки,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $V_{Z3}$  – об'єм по водному рівню ( $Z3$  – по міжнародному стандарту), л;  $\gamma$  – насипна маса,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

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:

$$V_{no} = \left( d \cdot h + \frac{1}{2} \cdot b \cdot h \right) A, \quad (3.38)$$

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

$$\tau = \frac{t_K - 0,25h / \cos \beta}{\mathcal{G}_L}, \quad (3.39)$$

де  $\beta$  – кут зачерпування ковша.

Об'єм не відсіченої частини потоку складе:

$$V_{пн} = \frac{A \cdot h \cdot a}{\cos \theta}. \quad (3.40)$$

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

$$\left. \begin{aligned} V_K &= V_{по} + V_{ост} \\ \psi_{Z3} &= \frac{V_K}{V_{Z3}}, \psi_{Z2} = \frac{V_K}{V_{Z2}} \end{aligned} \right\}, \quad (3.41)$$

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

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

$$V_{зач} = V_Z,$$

де  $V_{зач}$  – повинен відповідати  $V_{Z3}$ ;  $V_Z$  – забезпечується скинутими об'ємами не відсіченої частини потоку  $V_{пн}$  і витісненою з ковша частиною при зачерпуванні  $V_{кв}$ , відповідно:

$$V_Z = V_{пн} + V_{кв}. \quad (3.42)$$

Необхідний коефіцієнт заповнення необхідно визначати, як:

$$\psi_Z = \frac{Q_L}{Q_H}, \quad (3.43)$$

де  $Q_H = g_L \cdot n_K \cdot V_{Z3}$  – розрахункова витрата норії.

Що стосується, визначення коефіцієнтів заповнення по ходу, то їх розрахунок необхідно проводити за тими ж залежностями, 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.

### 3.2.3 Обґрунтування оптимальної висоти установки живильного лотка

У розд. 1.1 проаналізовано різні джерела та визначені рекомендації про необхідність установки напруги 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

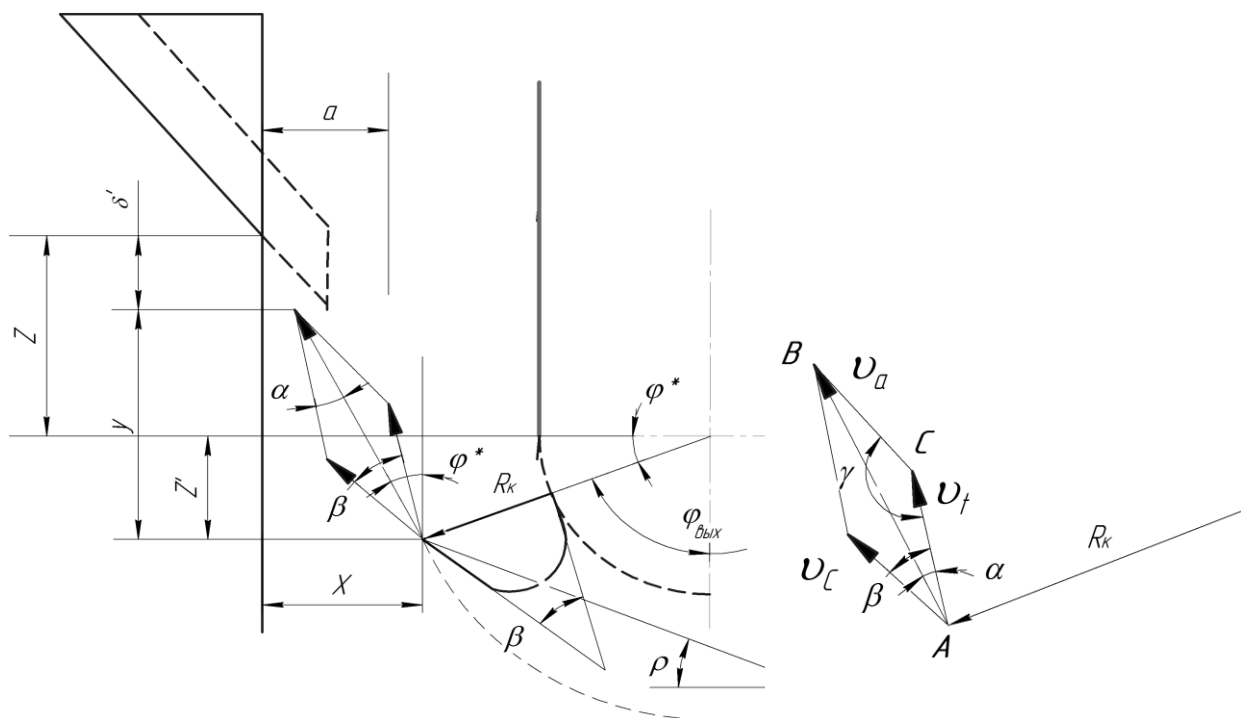
невиправданого збільшення висоти бункера.

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 викидаючого потоку з ковша, перебувала нижче точки виходу потоку з лотка (рис. 3.8).

Згідно з цією умовою:

$$Z^* = y - Z' + \delta', \quad (3.44)$$

де  $y$  – координата точки перетину вектора абсолютної швидкості  $\mathcal{V}_a$  зі стінкою бункера;  $Z'$  – відстань від точки виходу ковша з насипу до осі барабана;  $\delta'$  – необхідний запас висоти.



координати розташування ковша і лотка

напрямок векторів швидкості

Рисунок 3.8 – Схема викиду матеріалу з ковша

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  $\alpha$  знаходимо з рішення трикутника  $ABC$  (рис. 3.8, б):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\mathcal{G}_C \cdot \sin \gamma}{\mathcal{G}_t - \mathcal{G}_C \cdot \cos \gamma}, \quad (3.45)$$

де  $\gamma' = \pi - \beta$ ;  $\mathcal{G}_a = \sqrt{\mathcal{G}_t^2 + \mathcal{G}_C^2 + 2\mathcal{G}_t \cdot \mathcal{G}_C \cdot \cos \beta}$ ;  $\mathcal{G}_t = R_K \cdot \omega$  – окружна швидкість;  $\mathcal{G}_C$  – швидкість ковзання шару, що витискається з ковша при зачерпуванні з насипу;  $\beta$  – кут зачерпування ковша.

3.2.4 Аналіз розрахункових значень параметрів за отриманими залежностями

Для розрахунків у якості вихідних було використано данні, отримані у розд. 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; виліт 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/м<sup>3</sup>, 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. 3.3 та 3.4.

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.

Таблиця 3.3 – Розрахункові базові параметри заповнення ковшів

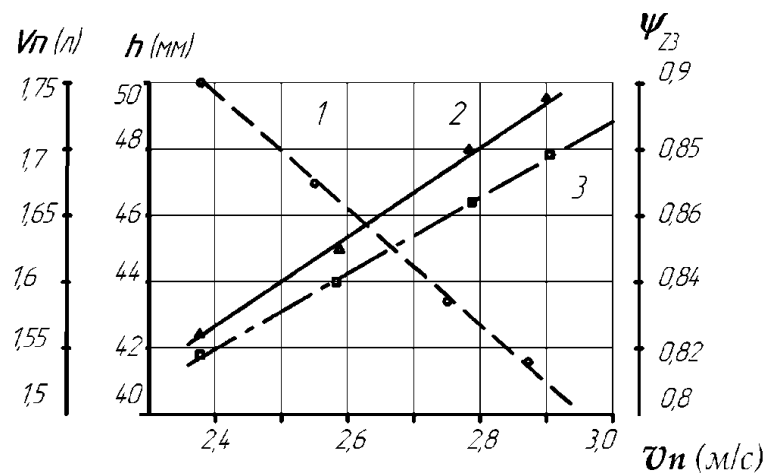
№№ п/п	Найменування	Позначення	Розмірність	Значення
1	Витрата живильного лотка	$Q_L$	л/с	34,7
2	Витрата норії	$Q_H$	л/с	39,6
3	Необхідний коефіцієнт заповнення	$\psi_z$	-	0,876
4	Коефіцієнт збільшення висоти потоку	$K_h$	-	1,834
5	Приведений коефіцієнт тертя	$f^*$	-	0,333
6	Об'єм матеріалу витисненого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

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.

Таблиця 3.4 – Результуючі параметри заповнення ковшів

№	Найменування	Позначення	Розмірність	Значення
1	Швидкість потоку	$v_{п}$	м/с	2,87
2	Висота живлячого лотка	$H$	мм	604
3	Висота установки лотка	$Z^*$	мм	119
4	Параметр входу потоку	$\delta$	мм	37
5	Висота потоку	$h$	мм	41,7
6	Максимально можлива висота	$h_{\max}$	мм	76,5
7	Допустима висота при $\Delta=15\text{мм}$	$[h_{\max}]$	мм	85,1
8	Час руху потоку після сходу з лотка	$\tau$	с	0,0765
9	Фактичний розрахунковий коефіцієнт заповнення	$\psi_{z3}$	-	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. 3.9. 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.



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

Рисунок 3.9 – Параметри заповнення ковшів при досипанні

На рис. 3.10. наведено значення максимальної висоти потоку, в результаті (внаслідок) утворюючої хвилі, і її допустимої висоти при різних прийнятих значеннях зазору  $\Delta$ . Зі збільшенням швидкості потоку його максимальна висота зменшується, а гарантований зазор  $\Delta$  буде зростати. Але при цьому заповнення ковша (відповідно до рис. 3.9) буде збільшуватися.

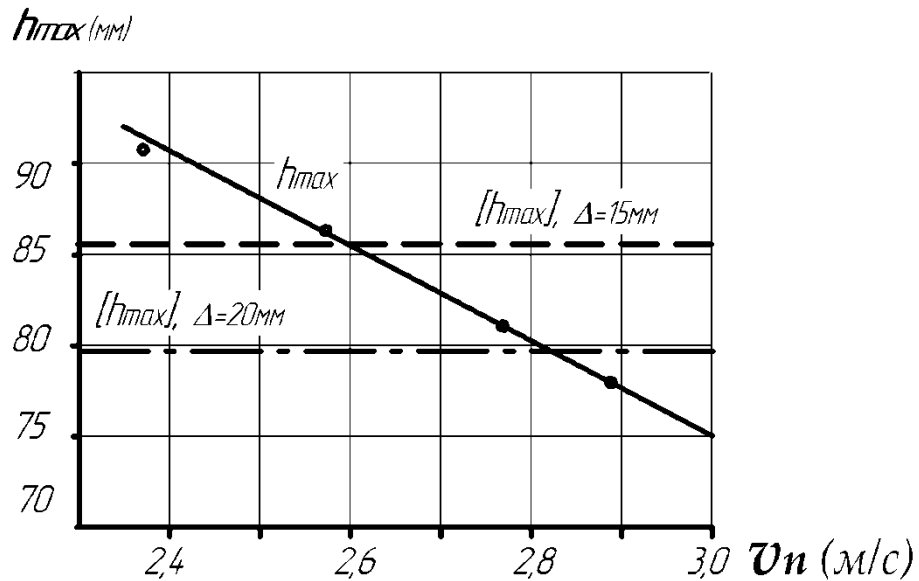


Рисунок 3.10 – Максимальна висота потоку  $h_{max}$  та його допустима величина  $[h_{max}]$

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. 3.5 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.



Таблиця 3.5 – Вплив зазору  $a$  на баланс об'ємів зачерпування і надходження в бункер

Зазор $a$ , мм	Об'єм матеріала, л					
	$V_{по}$	$V_K$	$V_{пн}$	$V_Z$	$V_{зач}$	$\psi_{z3}$
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 [79, 82]. Обидва показники явно завищені.

### 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 [82, 83].

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 відтворенню насипу проти ходу має місце зустрічний ударну дію.

Для виявлення причин травмування зерна розглянемо результати дослідження міцних властивостей зернових матеріалів, наведених в роботі [84] 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 борошністим 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 модулем 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 [85–87], 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%, соняшник – до 8%, арахіс – до 9%, інші масляні – 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, соняшникове лушпиння, 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 розд. 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 походу надзвичайно складно. В цьому випадку можна використовувати дані з роботи [88] про можливе збільшення обсягів ковшів понад стандартних на 10%, а коефіцієнт заповнення визначати за залежністю:

$$\psi_{nx} = \psi_{z3}^* \cdot \frac{1,1 \cdot V_{z2}}{V_{z3}}, \quad (3.46)$$

де  $\psi_{nx}$  – фактичний коефіцієнт заповнення по ходу;  $\psi_{z3}^*$  – фактичний коефіцієнт заповнення ковшів з зустрічного насипу;  $V_{z2}$  – стандартний повний обсяг ковша;  $V_{z3}$  – об'єм по водному рівню.

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

### 3.2.6 Дослідження опору зачерпування при 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:

$$F_{dS} = F_i + \sum_{k=1}^{n-1} F_{mk} + F_s, \quad (3.47)$$

де  $F_i$  – інерційна складова опору зачерпування;  $F_m$  – опір зсуву на поверхні руху маси матеріалу, що знаходиться між ковшами  $k$  і  $k+1$ ;  $F_s$  – опір 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  $\phi_{3ч}$ ;  $a_\tau$  – прискорення мас при пуску.

У відповідності до ствердження про (круглу) циліндричну поверхню зсуву, бокова поверхня зсунутих мас визначається площею кругового сегмента с центральним кутом  $\phi_{3ч}$ :

$$S_{CM} = \frac{R_K^2}{2} \left( \frac{\phi_{CM} \cdot \pi}{180} - \sin \phi_{3ч} \right). \quad (3.48)$$

Зрушувана маса при пуску буде рівна:

$$m_M = [A \cdot S_{CM} - V_{z2} \cdot (n-1)] \cdot \gamma, \quad (3.49)$$

де  $A$  – ширина ковша;  $V_{z2}$  – об'єм ковша по водному рівню;  $\gamma$  – насипна маса матеріалу.

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

$$a_{\tau} \approx \frac{2R_K \cdot \phi_{3\text{Ч}}}{t^2}.$$

Як відомо, час пуску  $t$  асинхронного двигуна визначається як [57, 89, 90]:

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

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

$$J_{np} = K(J_P + J_M) + \frac{m_X \cdot D_B^2}{4 \cdot i_P^2 \cdot \eta_M} + \frac{2J_B}{i_P^2}, \quad (3.50)$$

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;  $m_{OB} = 7,8 \cdot \pi \cdot D_B \cdot \delta \cdot V_B$  – маса барабана;  $\delta$  – товщина ободу барабана;  $V_B$  – ширина барабана.

Середній пусковий момент електродвигуна визначається з виразу [90]:

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

де  $\psi_{max} = \frac{T_{max}}{T_{НОМ}}$  – максимальна кратність пускового моменту;  $\psi_{min} = \frac{T_{min}}{T_{НОМ}}$  – мінімальна кратність пускового моменту.

Номинальний момент електродвигуна:

$$T_{НОМ} = 974 \frac{N_{\text{эд}}}{n_{\text{эд}}},$$

де  $N_{\text{эд}}$  и  $n_{\text{эд}}$  – 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;  $F_t = 1,1 \frac{Q \cdot H}{3,6 \cdot \vartheta_{\text{л}}}$  – окружне зусилля, що передається барабаном;  $Q$  – продуктивність норії (т/ч);  $H$  – висота норії;  $\vartheta_{\text{л}}$  – швидкість стрічки.

Маса ходової частини норії складе:

$$m_X = (2q_X + q_G) \cdot H + \pi \cdot D_B \cdot q_G, \quad (3.51)$$

де  $q_X$  и  $q_G$  – відповідно розподілені маси холостої та вантажної гілок норії.

Опор 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;  $\lambda$  – 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;  $\phi$  – кут знаходження ковша, відрхованій від вертикальної осі барабана.

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:

$$F_M = m_0 \cdot g \cdot \lambda \cdot \sin(90 - \phi). \quad (3.52)$$

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

$$F_S = 0,25 \cdot \sum_{k=1}^{n-1} F_C. \quad (3.53)$$

В табл. 3.6 наведено параметри зачерпування при пуску для норії продуктивністю  $Q = 100$  т/ч з наступними технічними характеристиками:  $g_{II} = 2,4$  м/с, кількість ковшів типу SPS280-180HP на 1 м  $n = 5$ , погона маса вантажу  $q_r = 113,7$  Н, електродвигун потужністю  $N_{\text{ЭД}} = 18,5$  кВт, частота обертання  $n_{\text{ЭД}} = 1470$  об/хв, момент інерції ротора  $J_p = 0,127$  кг·м<sup>2</sup>, кратності пускового моменту  $\psi_{\text{max}} = 2,4$  и  $\psi_{\text{min}} = 2,2$ , передаточне число привода 24,52, діаметр барабана  $D_B = 768$  мм, товщина стінки барабана  $\delta = 5$  мм, матеріал – пшениця с насипною густиною 800 кг/м<sup>3</sup>.

Таблиця 3.6 – Параметри зачерпування при пуску

$t_K$	$a_n$	$m_K$	$F_u$	$m_0$	$\varphi$	$\tau$	$F_C$	$\sum F_C$	$F_{TP}$	$\frac{F_{3AЧ}}{K_{3AЧ} \cdot q_r}$	$q_r$	$K_{3AЧ}$
с	м/с <sup>2</sup>	кг	Н	кг	град	Н/м <sup>2</sup>	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					

Встановлено, що коефіцієнт зачерпування при пуску складає  $K_{3AЧ} = 2,416$ , а загальний опір зачерпування –  $F_{dS} = 279,6$  Н (табл. 3.6).

### 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 врізанні ковшів в насип. Перші два види опору є постійними, і визначається сумою опору руху ковшів, які знаходяться на дузі їх переміщення в насипу (рис. 3.11). Третій вид опору є періодичним і носить ударний характер. Періодичність удару визначається часом повного заповнення ковшів в процесі зачерпування (рис. 3.12).

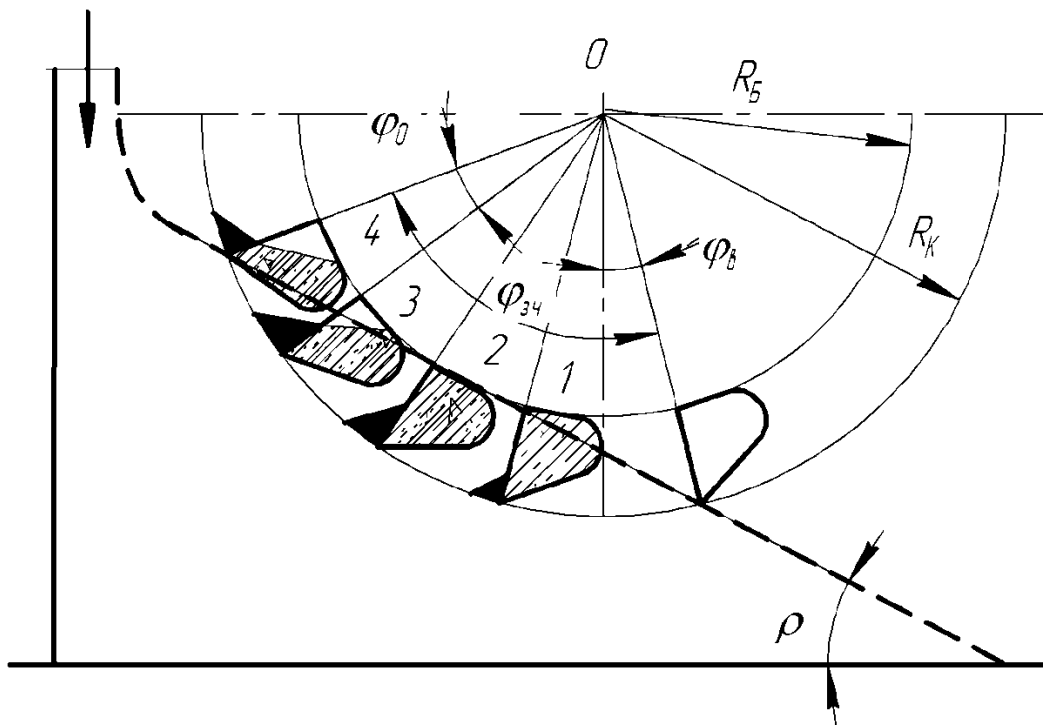


Рисунок 3.11 – Схема розміщення ковшів та призм на дузі черпання

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

$$F_{dp} = \sum_{k=1}^{n-1} F_C + F_S + F_b, \quad (3.54)$$

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.

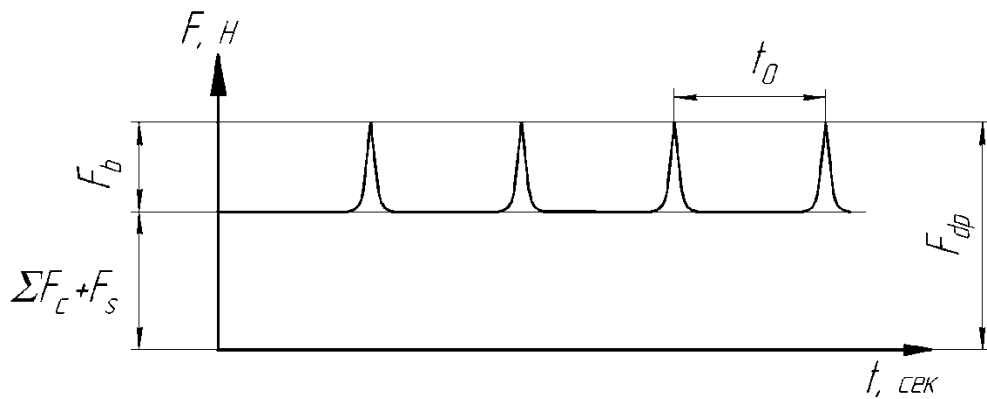


Рисунок 3.12 – Схема пульсацій опору зачерпуванню

На рис. 3.13 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:

$$h_c = \frac{1}{K_c} \cdot [h + h^* \cdot (V - V')], \quad (3.55)$$

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

рихлої та щільної структур.

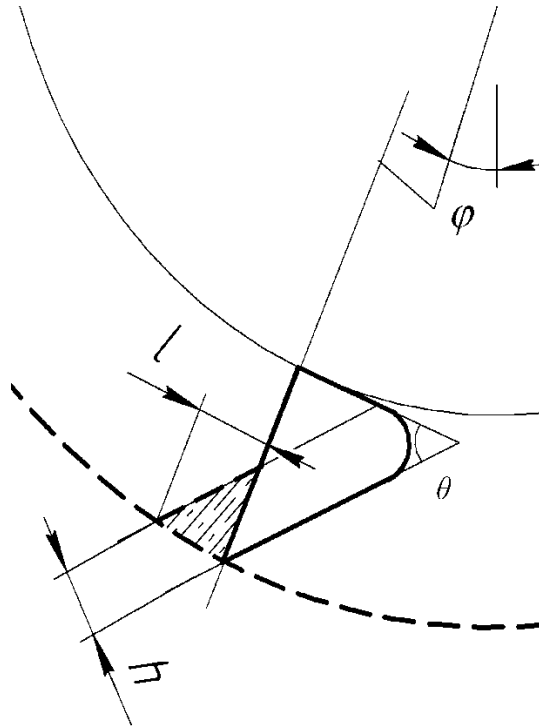


Рисунок 3.13 – Параметри призми витискання

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:

$$F_{ц} = m_p \cdot R_{ц} \cdot \omega^2. \quad (3.56)$$

Ущільнюючий тиск відповідно складе:

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

Довжину основи призми визначено як:

$$l = \frac{2V \cdot \sin(90 - \theta)}{A \cdot h_c}, \quad (3.57)$$

де  $\theta$  – кут зачерпування ковша.

В результаті опір зрушенню призми дорівнюватиме:

$$F_c = \tau \cdot A \cdot l, \quad (3.58)$$

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 роботах [91, 92] 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:

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

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

В цьому випадку зачерпувана маса визначиться, як:

$$m_b = V_{z2} \cdot \gamma \cdot K_c, \quad (3.59)$$

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

Сила удару буде рівна:

$$F_b = \frac{m_b \cdot g_{\text{л}}}{t_b \cdot \lambda}, \quad (3.60)$$

де  $t_b = \frac{\varphi_B^0 \cdot 3.14}{180 \cdot \omega}$  – час удару;  $\varphi_B$  – кут повороту при заповненні ковша

(рис. 3.11);  $\omega$  – кутова швидкість.

Таблиця 3.7 – Параметри зачерпування при сталому режимі

$\varphi$	$h_c$	$m_p$	$t$	$F_c$	$\theta$	$\sum F_c$	$t_b$	$F_b$	$F_s$	$F_{dp}$	$K_{зач}$
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						
----	-------	-------	-------	-------	--	--	--	--	--	--

В табл. 3.7 наведено параметри зачерпування при сталому режимі роботи норії, з технічною характеристикою, що розглянуто вище. Визначено коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії  $K_{зач} = 1,748$ ; опір зачерпування  $F_{dp} = 202,2$  Н.

### 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  $\rho$ . 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:

$$\Delta \approx 1,5h / \cos \rho,$$

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 [93], 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 [94].

### 3.5 Висновки по розділу

1. Вирішено науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення продуктивності зернових норій та забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів.

2. Теоретично досліджено норію з продуктивністю 100 т/год з наступними характеристиками: 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; виліт 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  $-725 \text{ т/м}^3$ , з попередньо визначеним коефіцієнтом тертя кочення зерен  $- f_k = 0,186$  і коефіцієнтом тертя по пластику  $f_c = 0,22$ .

3. Встановлено, що втрати об'єму 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. 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.

4. Визначено зміни параметрів заповнення ковшів в залежності від швидкості потоку. Отримано значення максимальної висоти потоку, в результаті (внаслідок) утворюючої хвилі, і її допустимої висоти при різних прийнятих значеннях зазору  $\Delta$ . Розраховано, що стабільна робота норії і необхідний коефіцієнт заповнення забезпечується при зазорі  $a = 60-62$  мм.

5. Встановлено, що 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. Зі збільшенням швидкості потоку його максимальна висота зменшується, а гарантований зазор  $\Delta$  буде зростати. Але при цьому заповнення ковша буде збільшуватися.

6. Визначено, що причина утворення затору у живильному лотку норій – взаємне проникнення зустрічних потоків, з лотка та витисненого з ковшу. Залежність для визнач

7. При запуску норії після завантаження бункера і утворення насипу відбувається заповнення ковшів, занурених в насип. Встановлено, що коефіцієнт зачерпування складає  $K_{зач} = 2,416$ , а загальний опір зачерпування –  $F_{дс} = 279,6$  Н. Запуск норії при порожньому бункері призводить до його тривалого заповнення і до тривалої роботи норії зі зниженою продуктивністю. Коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії складає –  $K_{зач} = 1,748$ ; опір зачерпування  $F_{дп} = 202,2$  Н. Збільшення коефіцієнтів зачерпування при збільшенні швидкостей руху носить нелінійний зростаючий характер. При швидкостях понад 5 м/с різко зростає питома потужність приводу.

8. Визначено, що висота встановлення завантажувального лотка повинна складати 119,6 мм, а у відомих конструкціях норій з продуктивністю до 100 т/год знаходиться в межах 0,4-0,5 м та 0,5-0,57 м (з продуктивністю від 100 до 350 т/год), тобто значно перевищує розраховане значення.



## РОЗДІЛ 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 норії. 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 [16, 17].

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.

## 4.1 Планування експерименту та методика обробки даних дослідження

### 4.1.1 Визначення необхідної кількості дослідів

Завдання планування експерименту полягає у визначенні кількості дослідів в кожному конкретному дослідженні, достатньої для достовірного відображення процесу. Інакше кажучи, слід визначити таку мінімальну кількість дослідних точок, яка добре представляла б криву функціональних залежностей досліджуваних параметрів. В основі планування покладено принцип багаторазового вимірювання однієї і тієї ж величини в тотожних умовах з метою мінімізації сумарної випадкової помилки вимірювань. У процесі планування необхідної кількості дослідів використані наступні показники:

1. Середня арифметична величина результатів вимірювань:

$$\bar{a} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n a_t}{n}, \quad (4.1)$$

де  $a_1 + a_2 + \dots + a_n$  – сума результатів окремих вимірювань;  $n$  – кількість вимірювань.

2. Дисперсія випадкової величини, як середнє значення квадрата відхилень випадкової величини від її середнього значення:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (a_t - \bar{a})^2}{n-1}. \quad (4.2)$$

3. Середнє квадратичне відхилення або стандарт:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (a_t - \bar{a})^2}{n-1}}. \quad (4.3)$$

Стандарт має розмірність величини, для якої він обчислений.

4. Найбільша помилка середньої арифметичної величини багаторазових вимірювань, яка є абсолютною величиною і для більшості технічних

вимірювань:

$$\Delta_n(\bar{a}) = \pm 3\sigma. \quad (4.4)$$

5. Відносна величина похибки:

$$\frac{\Delta_n(\bar{a})}{\bar{a}} = \pm \frac{3\sigma}{\bar{a}} \cdot 100\%. \quad (4.5)$$

Ця помилка є найбільшою можливою статистичною помилкою.

З теорії помилок відомо, що якість дослідів залежить від стандарту і заданої надійності результату. Тому, чим більше відносні коливання результатів і чим більшу надійність досвіду бажано отримати, тим більшим має бути число повторень.

Таблиця 4.1 – Необхідна кількість дослідів

Похибка $\Delta$	Надійність досліду							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,99	0,999
3,0	1	1	1	1	2	3	4	5
2,0	1	1	1	2	3	4	5	7
1,0	2	2	3	4	5	7	11	17
0,5	3	4	6	9	13	18	31	50
0,4	4	6	8	12	19	27	46	74
0,3	6	9	13	20	32	46	78	127
0,2	13	19	23	43	70	99	171	277
0,1	47	72	169	266	273	387	668	1099

Планування експерименту значно спрощується з використанням рекомендованої в роботі [95] таблиці, в якій наведено необхідну кількість дослідів (вимірювань) залежно від заданої надійності досліду і відносної помилки.

Необхідну кількість дослідів з табл. 4.1. визначаємо в наступному порядку:

1) у зв'язку з нестабільністю структури зернового матеріалу та його вологості проводимо попередню пошукову кількість дослідів, не менше 5-10;

2) визначаємо середню арифметичну і середнє квадратичне відхилення (стандарт) попереднього вимірювання відповідно за формулами (4.1) та (4.3);

3) визначаємо відносну величину помилки за формулою (4.5);

4) вибір надійності рекомендується зробити наступним чином: при дослідженні закономірності кривих розвитку явища –  $H = 0,7...0,9$ ; при визначенні деталей закономірності і значення величини, що є основою для подальшого розрахунку, необхідна надійність –  $H = 0,95...0,99$ ;

5) відповідно до величини відносної помилки і заданої надійності визначаємо за табл. 4.1 мінімальну кількість повторів вимірювань та середню арифметичну цих мінімальних вимірювань, яку і приймаємо за остаточний результат величини, що досліджується.

#### 4.1.2 Методика графічної обробки дослідних даних

Прийнятою програмою експериментальних досліджень не передбачається визначення функціональних залежностей для досліджуваних параметрів, тому для побудови графіків по дослідним точкам застосовуємо метод графічного згладжування [95]. Основне правило цього методу: плавна крива повинна бути, можливо, ближче до всіх дослідних точок. Це не означає, що крива обов'язково повинна проходити через більшість дослідних точок. Основні вимоги при побудові кривих методом графічного згладжування наступні:

1. Сума відрізків нормалей, опущених з дослідних точок на криву повинна дорівнювати нулю.

2. Якщо з'єднати всі дослідні точки прямими і провести плавну криву, то сума площ, відсічених кривою по обидві її сторони, повинна дорівнювати нулю; як у першому, так і в другому випадку приймаються різні знаки для точок, що знаходяться по різні сторони від кривої.

3. В обох випадках необхідно також, щоб сума абсолютних величин, тобто відрізків нормалей або площ, була мінімальною.

Точно побудована крива повинна задовольняти всім трьом вимогам одночасно.

При побудові кривої методом графічного згладжування необхідно бракувати, так звані браковані точки, тобто точки, які виходять за межі можливих помилок. Ці точки можуть бути наслідком грубої помилки у вимірах, в цьому випадку необхідно повторити вимірювання, перевіривши справність приладів, щоб переконатися, що бракована точка не є наслідком неправильного вимірювання.

Вважається, що відхилення від середньої арифметичної не повинно перевищувати граничної помилки середньої арифметичної, тобто  $3\sigma$ . Тому відхилення, що перевищує за своїм значенням  $3\sigma$ , показує, що точка бракована і підлягає відкиданню.

Умову браку можна представити у вигляді:

$$a_{n+1} - \bar{a} > 3\sigma, \quad (4.6)$$

де  $a_{n+1}$  – сумнівний результат досвіду.

## 4.2 Дослідження фізико-механічних властивостей зернових матеріалів

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

### 4.2.1 Визначення пористості зернових матеріалів при різній вологості

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

$$m = 1 - \frac{q_{px}}{q};$$

$$n = 1 - \frac{q_{nl}}{q},$$
(4.7)

де  $q_{px}$  і  $q_{nl}$  – відповідно, питомі маси пухкої і щільною структур, г/см<sup>3</sup>;  
 $q$  – дійсна густина суцільного зернового матеріалу, без зазорів і пір, г/см<sup>3</sup>.

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 циліндричної мірній колбі об'ємом 200 мл (рис. 4.1). 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 (рис. 4.2). Утворення пухкої і щільної структур проводилося наступним чином. Пухка структура створювалася відповідно до рекомендацій, що наведені у роботі [96] 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 30мл) з наступними п'ятикратними коливаннями в горизонтальній площині в двох взаємно перпендикулярних напрямках. Потім кожен шар ущільнювався спеціальної 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  $q$ , як відношення маси одного зерна до його об'єму ( $\text{г}/\text{см}^3$ ), 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 (потоплюючих) 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 (непотоплюючий) визначався шляхом вимірювання об'єму відбитка в пластиліні, заповнені водою. Дослідження проводилося на 25 відбитках з 15 проб.



Рисунок 4.1 – Мірна колба 200 мл



Рисунок 4.2 – Ювелірні ваги

Доведення зерна до певної вологості (12,5–20%) виробляли за методикою, перевіреної в роботі [97]. Зерно, при його зволоженні методом додавання розрахункової кількості води, поміщали в літрову банку. Кількість води, що додається до зерна  $G_v$ , мл, розраховувалося за формулою:

$$G_B = m_H \frac{w_K - w_H}{100 - w_H}, \quad (4.8)$$

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. 4.3) з числом вимірюваних культур рівним 16. Середня арифметична величина вологості визначалася шляхом вимірюванням 7 проб, які розміщені в чашу приладу.



Рисунок 4.3 – Електронний вимірювач вологості WILE-55

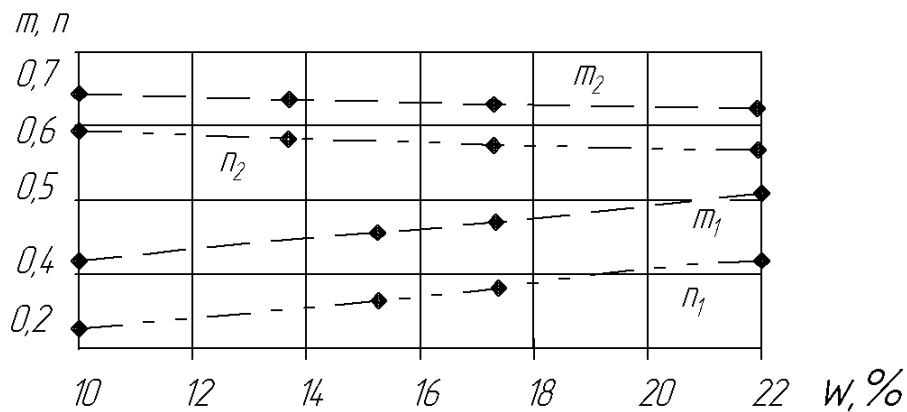
Результати досліджень наведені в табл. 4.2 для насіння соняшнику і пшениці.

Характер зміни пористості пухкої і щільною структур в залежності від вологості наведено на (рис. 4.4). Залежності мають лінійний характер, тому проміжні значення можна визначити шляхом лінійної інтерполяції.



Таблиця 4.2 – Залежність параметрів пористості від вологості

Матеріал	W, %	8,2	13,6	17,6	22
Соняшник	$q_z$ , г/см <sup>3</sup>	0,985	0,986	0,989	0,992
	$q_{px}$ , г/см <sup>3</sup>	0,317	0,344	0,356	0,353
	$q_{пл}$ , г/см <sup>3</sup>	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	$q_z$ , г/см <sup>3</sup>	1,33	1,29	1,278	1,262
	$q_{px}$ , г/см <sup>3</sup>	0,755	0,691	0,66	0,615
	$q_{пл}$ , г/см <sup>3</sup>	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



$m_1$  та  $n_1$  – відповідно пористість пухкої і щільної структури пшениці;  
 $m_2$  та  $n_2$  – відповідно пористість пухкої і щільної структури соняшнику

Рисунок 4.4 – Залежність пористості шару зерна від вологості

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.

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  $150 \text{ см}^3$ , 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  $300 \text{ см}^3$ , 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 лущиння реальна продуктивність складає 70 т/ч при необхідної (розрахункової) 100 т/ч. Датська фірма «Монсун» для норій, що транспортують ячмінь визначає параметри, беручи значення об'ємної маси

700 кг/м<sup>3</sup>. За Г. Клейном вона знаходиться в межах 430–750 кг/м<sup>3</sup>, а отримані нами дані для ячменю вологістю  $W = 15\%$   $q_{\text{рх}} = 520$  кг/м<sup>3</sup> та  $q_{\text{пл}} = 650$  кг/м<sup>3</sup>.

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. 2.1.

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 [62]:

$$d_y = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}, \quad (4.9)$$

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

Однак, як було показано в розд. 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 [98] пропонують уточнювати значення умовного діаметра в залежності від конкретних форм частинок наступними співвідношеннями:

а) для частинок у формі прямого конуса:

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

де  $d_K$  – діаметр основи конуса;

б) для частинок у вигляді правильної піраміди:

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

де  $S$  – площа основи піраміди;

в) для частинок у вигляді просторового клина:

$$\frac{d_y}{\sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}} = 0.96;$$

г) для частинок у вигляді параболічної бочки:

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

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. 2.1) 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. 4.5). Розрахунковий обсяг еліпсоїда в цьому випадку складе:

$$V = \frac{4}{3} \pi [(a_{cp} - 2\Delta_1) \cdot b \cdot c], \text{ мм}^3, \quad (4.10)$$

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

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

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. 4.6). Обсяг такої піраміди згідно з даними експерименту можна представити у вигляді:

$$V = \frac{1}{2,2} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3 \quad (4.11)$$

де  $S = \frac{1}{2} \cdot b_{\max} \cdot c_{\max}$ ,  $b_{\max}$  и  $c_{\max}$  – діагоналі ромба, максимальна ширина і товщина у відповідність з даними табл. 2.1.

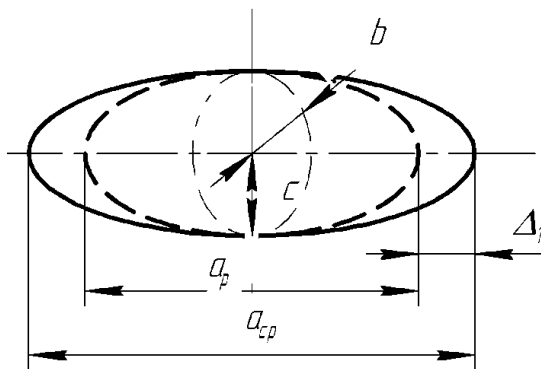


Рисунок 4.5 – Форма зернини

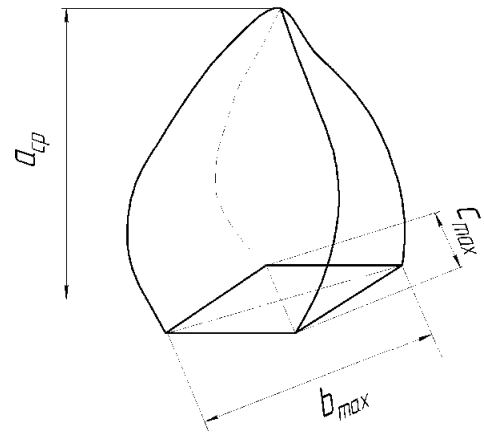


Рисунок 4.6 – Форма насіння соняшника

в) кукурудза. Формою кукурудзи є піраміда з основою у вигляді овалу. (рис. 4.7). Обсяг піраміди складе:

$$V = \frac{1}{3} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3, \quad (4.12)$$

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

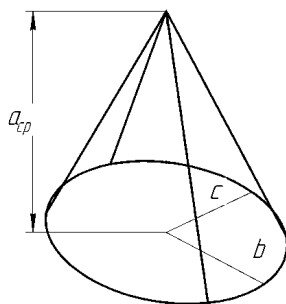


Рисунок 4.7 – Форма зернини кукурудзи

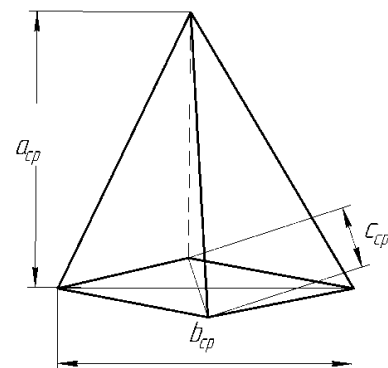


Рисунок 4.8 – Форма зернини гречки

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

$$V = \frac{1}{3} \cdot S \cdot a_{cp}, \text{ мм}^3, \quad (4.13)$$

де  $S = \frac{1}{2} \cdot b_{cp} \cdot c_{cp}$ ,  $b_{cp}$  и  $c_{cp}$  – діагоналі основи;

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

$$V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d_{cp}^3, \text{ мм}^3, \quad (4.14)$$

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

#### 4.2.2 Визначення коефіцієнта зсуву по параметрам осесиметричного укусу

У розд. 2 була отримано залежність (2.13), згідно до якої стає можливим визначати коефіцієнти зсуву за значеннями кута укусу 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 укусу.

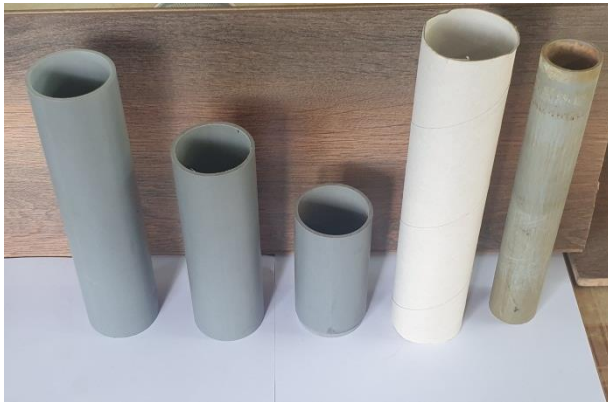
Кут природного укусу, можливо, визначити трьома способами: при утворенні укусу шляхом насипання матеріалу на опорну поверхню, освітою укусу за допомогою утворює циліндра і в ящику Кулона з підйомної стінкою. У перших двох випадках утворюється осесиметричних укис у вигляді конуса. В ящику Кулона при підйомі стінки відбувається обвалення сипучого матеріалу з утворенням несиметричного укусу. У всіх трьох випадках кут природного укусу має різні значення. За результатами численних досліджень відомо, що кут природного укусу при насипання менше кута укусу, отриманого в ящику Кулона. Г.К. Клейн вважає, що це пояснюється різної рухливістю часток, яка залежить від розподілу тиску на схилі. В роботах [99–

101] 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. 4.10). При цьому кут природного укосу може коливатися в межах  $10^\circ$ , і тому показником для опору зрушенню і витіканню сипкого матеріалу бути не може.

Форма осесимметричного укосу із застосуванням утворює циліндра 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 осесимметричного 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 (рис. 4.9, а). 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. 4.10, 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. 4.10, б, в, г).

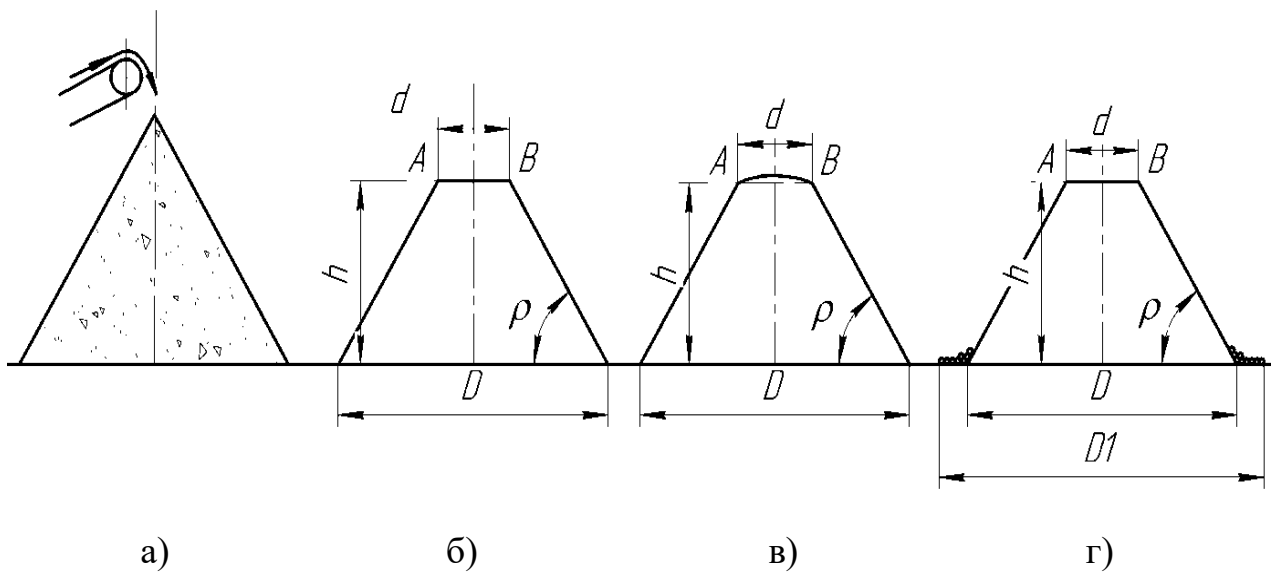


а)



б)

Рисунок 4.9 – Циліндри для утворення осесиметричних відкосів (а) та їх форма (б)



а)

б)

в)

г)

а – при насипання; б, в, г – при обваленні

Рисунок 4.10 – Форми осесиметричних укосів

Зернові матеріали з кулястою формою частинок відсипаються, утворюючи в нижній частині конуса шар з одинарних зерен, не впливаючи на кут укосу (рис. 4.10, г), тому діаметр  $D_1$  в розрахунок не береться. Таким чином, кут природного укосу визначається по залежності:



$$\operatorname{tg} \rho = \frac{2h}{D-d}. \quad (4.15)$$

Другим завданням дослідження осесиметричного укосу, одержуваного за допомогою утворює 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. 4.3 наведені параметри укосів, отриманих застосуванням трьох типів утворюють 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 4.3 – Параметри осесиметричного природного укосу на різних опорних площинах при різних розмірах утворюючого циліндра

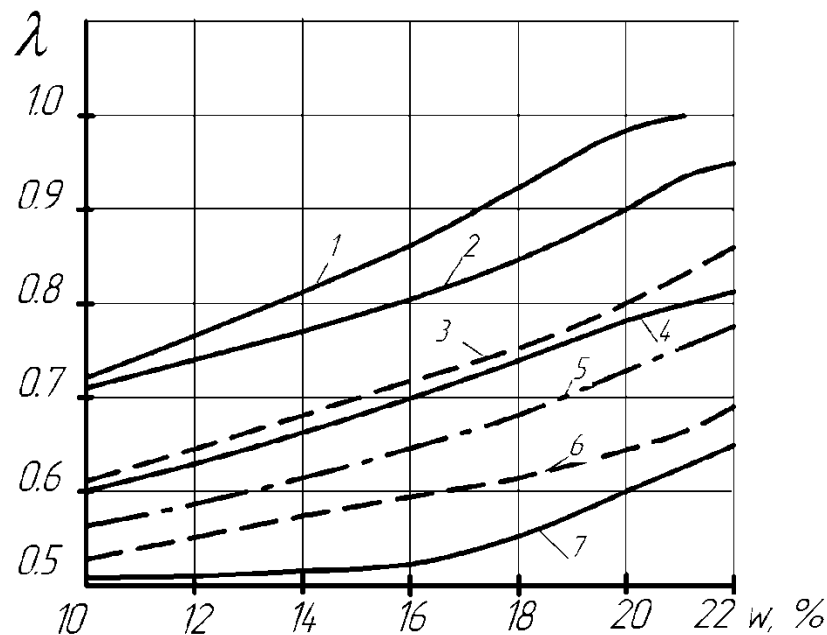
Матеріал	№ цил.	$d$	$d_1$	$h$	$\operatorname{tg} \rho$	$\rho$	$\lambda$
		мм	мм	мм		град	
Пластик, поліуретан	1	117	25	23,5	0,51	27°6'	0,615
	2	145	32	29	0,513	27°12'	0,619
	3	118	21	25	0,515	27°24'	0,623
Гладка сталь	1	118	23	24,5	0,515	27°24'	0,623
	2	142	30,5	29	0,517	27°18'	0,625
	3	121	24,5	24,8	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. 4.4 та рис. 4.11 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.

Таблиця 4.4 – Залежність параметрів опору зрушенню від вологості

Пшениця $Y=0,52$	<b>W</b>	9,7	14,8	17,4	20,4	Кукурудза $Y=0,58$	<b>W</b>	9,4	13,8	16,6	20,4
	$\lambda$	0,611	0,696	0,728	0,778		$\lambda$	0,718	0,807	0,887	0,985
	$f$	0,532	0,612	0,649	0,67		$f$	0,687	0,748	0,809	0,857
	$\mu$	0,091	0,17	0,205	0,256		$\mu$	0,138	0,227	0,307	0,405
Соняшник $Y=0,45$	<b>W</b>	8,2	13,6	17,4	22	Просо $Y=0,492$	<b>W</b>	8,4	15,1	16,8	20,1
	$\lambda$	0,684	0,778	0,83	0,944		$\lambda$	0,519	0,561	0,613	0,645
	$f$	0,543	0,6	0,629	0,697		$f$	0,46	0,494	0,523	0,554
	$\mu$	0,237	0,323	0,38	0,494		$\mu$	0,027	0,07	0,121	0,153



1 – кукурудза; 2 – соняшник; 3 – гречка; 4 – пшениця; 5 – соя; 6 – просо; 7 – горох

Рисунок 4.11 – Залежність коефіцієнта опору зрушенню від вологості

Відомо, що опір зрушенню залежить від щільності структури сипучого матеріалу. Наведені на рис. 4.11 залежності, отримані по кутах

осесиметричного укосу при заповненні утворюючого циліндра зерном без ущільнення. У табл. 4.5 та 4.6 приведені величини коефіцієнтів опору зсуву, отримані при заповненні циліндра з ущільненням (згідно з раніше застосовуваної методикою –  $\lambda^*$ ) і без ущільнення –  $\lambda$ . Згідно з цими даними, ущільнення матеріалу в циліндрі не призводить до збільшення кута укосу, параметри укосу змінюються, але кут укосу не змінюється, а, отже, і коефіцієнт опору зрушенню, визначеного таким чином. Це є найважливішою перевагою такого способу.

Таблиця 4.5 – Значення параметрів укосу і коефіцієнта зсуву від щільності укладання матеріалу в циліндрі

Матеріал	Стан	$d$	$d_1$	$h$	$\rho$	$\lambda$
		мм	мм	мм	град	
Кукурудза $W = 11,4 \%$ $Y=0,58$	Пухкий	104	31	26	$35^\circ 12'$	0,752
	Щільний	98	21	28.5	$35^\circ 48'$	0,766

Таблиця 4.6 – Коефіцієнти опору зрушенню в залежності від ущільнення

Матеріал	$W$	$d$	$d_1$	$h$	$\rho$	$\lambda^*$	$\lambda$
Пшениця	10,4%	110	18	26,5	$29^\circ$	0,625	0,615
Кукурудза	11,4%	98	18	26,5	$35^\circ 30'$	0,754	0,76

Порівняємо отримані результати з деякими відомими даними, отриманими для несиметричних укосів в ящику Кулона, що приведені у роботах (табл. 4.7) [102–104]. Для порівняльного аналізу обрані параметри укосів для сухих зернових матеріалів ( $W = 9,7–10\%$ ) у яких показники більш стабільні.

Таблиця 4.7 – Параметри укосів для різних культур

Матеріал	Параметри	Г. К. Клейн	В. В. Красніков	Осесиметричний укос
Соняшник $Y = 0,45$	$\rho$	$33^\circ$	$31^\circ$	$28^\circ 36'$
	$\lambda$	0,87	0,778	0,718
Кукурудза $Y = 0,58$	$\rho$	$35^\circ$	$36^\circ 30'$	$34^\circ 24'$
	$\lambda$	0,737	0,796	0,708
Горох $Y = 0,486$	$\rho$	$25^\circ$	$26^\circ$	$24^\circ 12'$
	$\lambda$	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 [105, 106] 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 металоємності конструкції.

#### 4.2.3 Визначення опору зрушенню зернових матеріалів

В даний час коефіцієнт опору зсуву визначають за методом Е. Дженіке, заснованого (як було показано у розд. 1) на застосуванні прямого зсуву шарів матеріалу з вимірюванням зсувного зусилля. Незважаючи на простоту, насправді цей метод є дуже складним і для отримання достовірних результатів, згідно з Е. Дженіке, необхідно забезпечувати такі умови:

- 1) стабільність зразка матеріалу по вологості;

- 2) стабільність гранулометричного складу шляхом відсіювання дрібних частинок (з розмірами менше 0,8 мм);
- 3) створення попереднього статичного ущільнення при утворенні зразка в процесі засипки в порожнину приладу;
- 4) подальше ущільнення зразка шляхом коливання в площині зсуву і невеликим попередніми зміщенням;
- 5) в процесі зсуву притискати вручну рухливу обойму, щоб уникнути її підняття і видавлювання матеріалу з площини зсуву;
- 6) безперервну реєстрацію зусилля зсуву, так як в процесі зсуву можливе додаткове ущільнення зі зміною зусилля зсуву;
- 7) точне визначення ущільнюючого тиску від забезпечують його мас матеріалу в рухомий обоймі і приймають вантажів.

Пропонована Е. Джейном установка для вимірювання опору зсуву та ущільнюючий верстат складають єдиний прилад, вмонтований в термостатуючу камеру. Для більшості підприємств, що працюють з сипучим вантажем для отримання більш швидких результатів, необхідно було просте пристосування, одне з них запропоновано у роботах [107–109]. Прилад складається з нерухомого жолоба 1, по напрямних а-а якого рухається короб 2, що не має дна і з'єднаний з вантажем 3 за допомогою шнура 4, перекинутого через блок 5 (рис. 4.12). Сипкий матеріал наповнює жолоб до рівня а-а, а частина матеріалу засипається в короб 2, поверхня його в коробі вирівнюється і на неї встановлюється притискна рамка 6 з набором притискних вантажів-пластин 7. На чашу 3 додають вантажі-гирьки до початку руху короба 2. Попередньо необхідно компенсувати опір руху самого короба і обертання блоку 5 підібраними додатковими важками в чаші 3.

Нормальні напруги можна визначити з формули:

$$\sigma = \frac{G_6 + G_7}{F} + h \cdot \gamma, \quad (4.15)$$

де  $G_6$  – вага рамки 6;  $G_7$  – вага пластин 7;  $F$  – площа перетину матеріалу в

коробі 2;  $h$  – висота шару матеріалу в коробі 2;  $\gamma$  – об'ємна вага насипного вантажу.

Дотичне напруження по площині зсуву обчислюється з виразу:

$$\tau = \frac{G_5(1 - W\sqrt{2})}{F}, \quad (4.16)$$

де  $G_5$  – вага вантажу 3 без компенсуючих вантажів;  $W$  – коефіцієнт опору обертанню блоку 5.

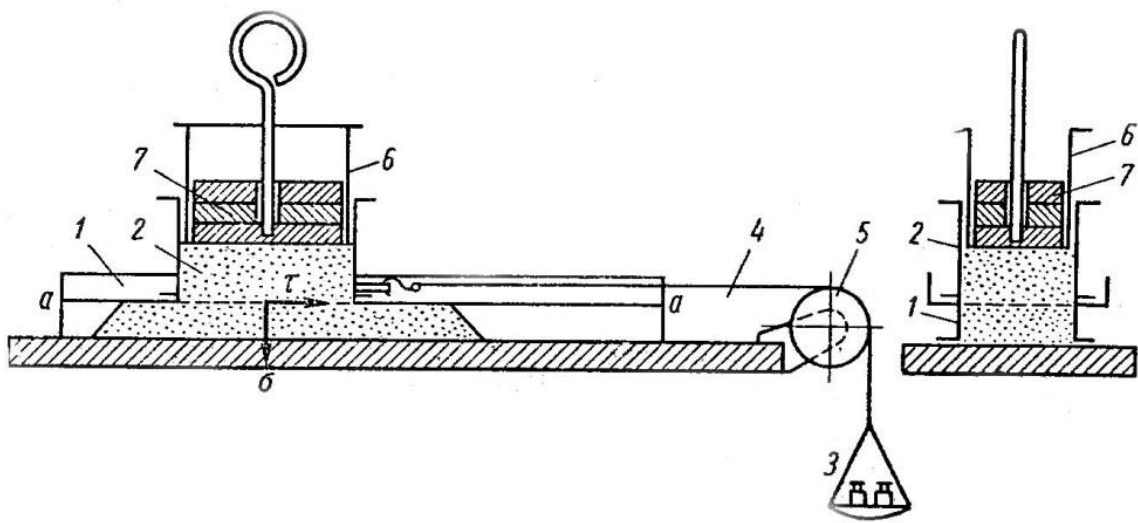


Рисунок 4.12 – Прилад для визначення опору зсуву

Серія отриманих значень  $\sigma$  і  $\tau$  дозволяє побудувати графік граничних дотичних напружень в даному інтервалі  $\sigma$ . При малих значеннях  $\sigma$  трибометр дає значний розкид експериментальних точок внаслідок впливу випадкових малих опорів переміщенню короба 2.

Слід зазначити, що даний прилад не дозволяє отримати точні значення опору зрушенню з наступних причин: необхідна безперервна реєстрація зусилля зсуву, так як максимальна його величина виникає не спочатку зсуву, вимірюваного набором гирь. Потрібен великий набір з точно встановленої масою гирь, але навіть при цьому встановити початкове зусилля зсуву дуже проблематично. Основна похибка визначається за необхідне встановленням

точного значення об'ємної маси насипного вантажу  $\gamma$ , яка залежить від його щільності укладки в коробці 2. Таким чином, нормальна напруга (ущільнюючий тиск) за (4.15) буде мати велику похибку, так само як і дотичне напруження  $\tau$ . Розроблено пристосування для визначення опору зсуву зернових матеріалів і методика проведення дослідження.

Методика Е. Дженіке дозволяє визначити опір зрушенню сипучого матеріалу, обмеженого бічними стінками. Як зазначається методом досліджень (Г. Клейном, Г.І. Покровським, А.В. Гячев і ін.) для зв'язкових матеріалів має місце збільшення тиску під стінами внаслідок обмеження переміщення частинок в цьому напрямку. Для таких матеріалів це збільшення становить від 1,4 до 1,7. Для зернових матеріалів вплив стінки невідомо. Крім того, при деяких технологічних операціях із зерном витікання відбувається без наявності обмежувальних стінок.

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 (розд. 2) і даними багатьох авторів (Г. Клейн, Р. Тейлор і ін.) зрушення і перехід до щільній структурі 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 (пухкої) 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 (рис. 4.13) з великим для даного дослідження діапазоном вимірюваного навантаження (до 2 кг) і з малою ціною поділки (0,05 кг).



а



б

Рисунок 4.13 – Механічний динамометр (а) та набір гирь (б)

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  $\tau = 2pY\lambda$ , відповідно:

$$\lambda = \frac{\tau}{2p \cdot Y}, \quad (4.17)$$

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. 4.8 наведені значення коефіцієнтів опору зсуву  $\lambda_1$ , отримані за методом Е. Дженіке на жолобі, і для порівняння –  $\lambda_0$ , отримані за параметрами осесиметричного укусу 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%.

Таблиця 4.8 – Залежність коефіцієнтів опору зсуву від вологості пшениці

$W$	$N$	$G$	$S$	$p$	$F_c$	$\tau$	$\lambda_1$	$\lambda_0$	$h$
%	кг/м <sup>3</sup>	Н	м <sup>2</sup>	Н/м <sup>2</sup>	кг	Н/м <sup>2</sup>			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 ( $S = 0,00828$  м<sup>2</sup>) та великої ( $S = 0,0182$  м<sup>2</sup>) рамки. Значення  $\lambda_1$  у всіх випадках незначно (в межах 1,5%) перевищували значення  $\lambda_0$ .

У табл. 4.9 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  $\lambda_1$  при зсуві по жолобу більше значень  $\lambda'_1$ , отриманих при зсуві по зерновому масиву,

в свою чергу значення при зсуві рамки по масиву менше  $\lambda_0$ . У всіх випадках значення відрізнялися на 1,7-2,8%, що для практичних розрахунків процесів цілком прийнятне. Ширина ящика для зерна (рис. 4.15) дозволяла встановити перегородку для утворення в зерновому масиві каналу, по якому також пересувалися рамки трьох розмірів (рис. 4.17).

Таблиця 4.9 – Значення коефіцієнтів  $\lambda$  при зсуві по жолобу, по масиву і по схилу

Матеріал	$N$	$F_C$	$\tau$	$p$	$\lambda_1$	$\lambda_0$	$\delta$
	кг/м <sup>3</sup>	кг	Н/м <sup>2</sup>	Н/м <sup>2</sup>	-	-	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  $\varepsilon$ , за залежністю:

$$\varepsilon = \frac{\lambda_1 - \lambda'_1}{\lambda_1}. \quad (4.18)$$

Значення  $\varepsilon$  отримані в межах 1,033...1,045, в той же час для зв'язкових сипучих матеріалів цей коефіцієнт становить 1,4...1,7 [110]. 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.

У процесі дослідження опір зрушенню зернових матеріалів за методом Е. Дженіке був встановлений характер ущільнення в площині зсуву і відповідно зміна величини зсувного зусилля.

В процесі дослідження опір зрушенню зернових матеріалів за методом Е. Дженіке був встановлений характер ущільнення в площині зсуву і відповідно зміна величини зсувного зусилля.

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. 4.14). 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. 4.15). Внаслідок цього ущільнюючий тиск зменшується і зменшується сила зсуву. За рамкою утворюється канавка, дно якої має ущільнюючу структуру (рис 4.16). Така ж картина спостерігається і при зсуві

рамки по масиву. Але при цьому глибина канавки більше, оскільки частина матеріалу витісняється в бік.

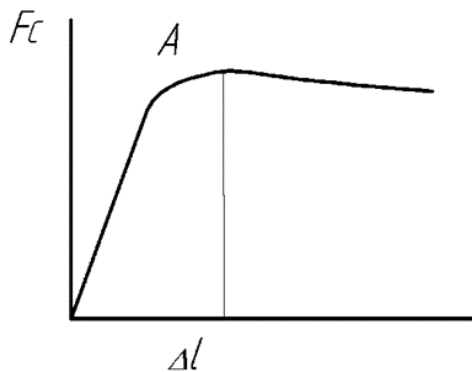


Рисунок 4.14 – Залежність зрешуючої сили від величини переміщення



Рисунок 4.15 – Процес зсуву рамки з зерном під вантаженням

Таким чином, твердження багатьох авторів [110–112] Про те, що максимальна сила є, при подальшому зсуві, величиною постійною, не відповідає дійсності. Тому за методом Е. Дженіке необхідно якомога точніше встановити максимальне значення зрешуючої сили (в т. А, рис. 4.14).



Рисунок 4.16 – Утворення ущільненої, орієнтованої структури в процесі зсуву



Рисунок 4.17 – Комплект рамок для дослідів

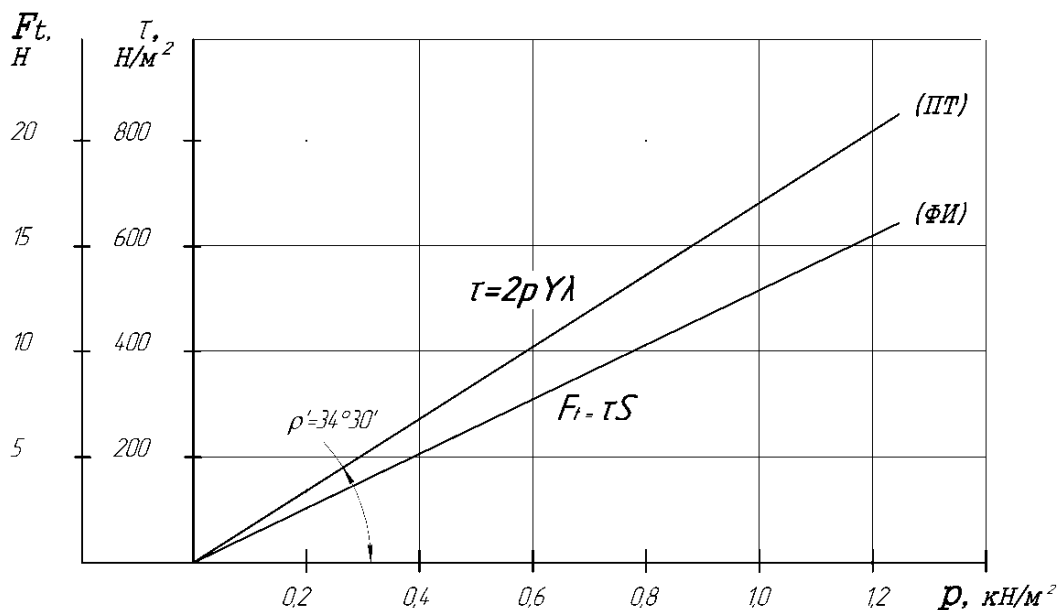


Рисунок 4.18 – Лінії граничних дотичних напружень (ПТ) і граничних сил зсуву (ФИ)

На рис. 4.18 наведено лінії граничних дотичних напружень (меж плинності ПТ по Е. Дженіке) і граничних зсуваючих сил (функції течії ФМ 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.

#### 4.3 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 [112, 113] наголошувалося на важливості вибору зернового зразка для отримання достовірних результатів. Приводиться аналіз пропонованих іншими авторами способів отримання зразків, таких як приклеювання насіння, до рухомого елемента або вдавнення їх в пластиліновий брусок. При цьому справедливо

значалося, що використання таких зразків не відображає рух зернового потоку, і не дозволяє отримати повністю адекватні результати. Запропоновано пересувати короба (рамку) без дна, заповнену зерном, піднімаючи її на 1-2 мм, щоб виключити сили тертя самої коробки. Фактично це метод Е. Дженіке, але в такому виконанні є істотний недолік – неможливо точно визначити силу нормального тиску, так як вона залежить від величини насипної маси, яка, в свою чергу, залежить від щільності укладання.

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 укладанні. 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:

$$f_d = f_{CT} + f_k. \quad (4.19)$$

Цей ефект має місце, як при переміщенні багаторядного шару, так і однорядного. Але для однорядного шару коефіцієнт тертя кочення менше, так як менше число контактних точок. Поверхні робочих елементів норій покривають шаром пластика (пластинами або вставками з поліуретану) або додатковими накладками зі сталі, тому дослідження проводилися на поверхнях з цих матеріалів. Результати досліджень наведено на рис. 4.19 і в табл. 4.10 і 4.11.

Таблиця 4.10 – Коефіцієнти тертя пшениці по поліуретану

Вид шару	Вологість, W, %	8,8	12,8	14,9	18,2	21,3
багаторядний	$F_N, \text{кГ}$	2,158	2,154	2,149	2,145	2,144
	$F_{CT}, \text{кГ}$	0,35	0,53	0,634	0,84	1,12
	$F_d, \text{кГ}$	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	$F_N, \text{кГ}$	2,06				
	$F_{CT}, \text{кГ}$	0,3	0,436	0,52	0,66	0,81
	$F_d, \text{кГ}$	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

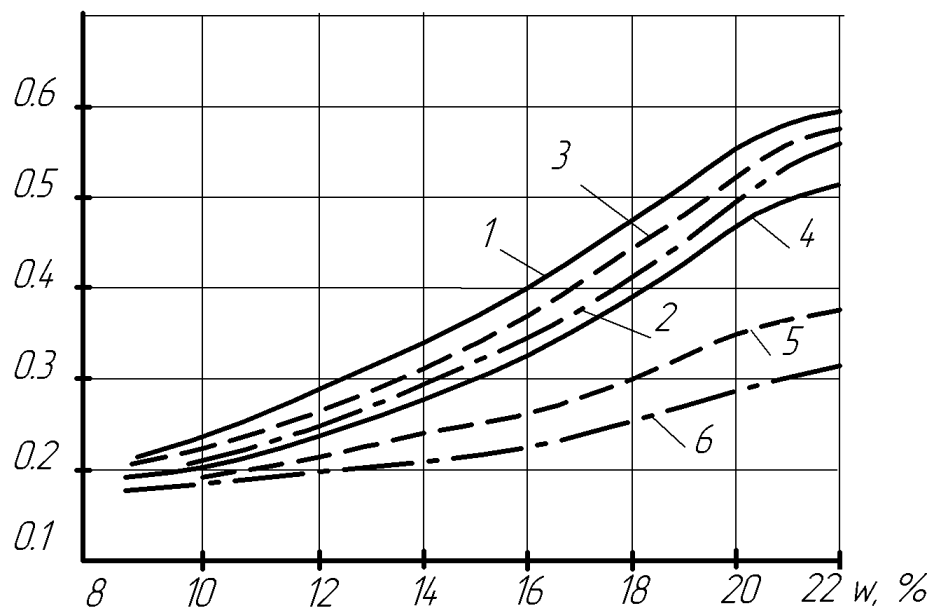
Другий отриманий ефект полягає в тому, що при русі зернового



матеріалу з вологістю більше 17–18% сила тертя є уривчастою: зв'язки частково розриваються і тут же відновлюються (рис. 4.20, а). Цей ефект спостерігається при русі незакруглених зерен, і відсутній для круглих зерен (рис. 4.20, 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.

Таблиця 4.11 – 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

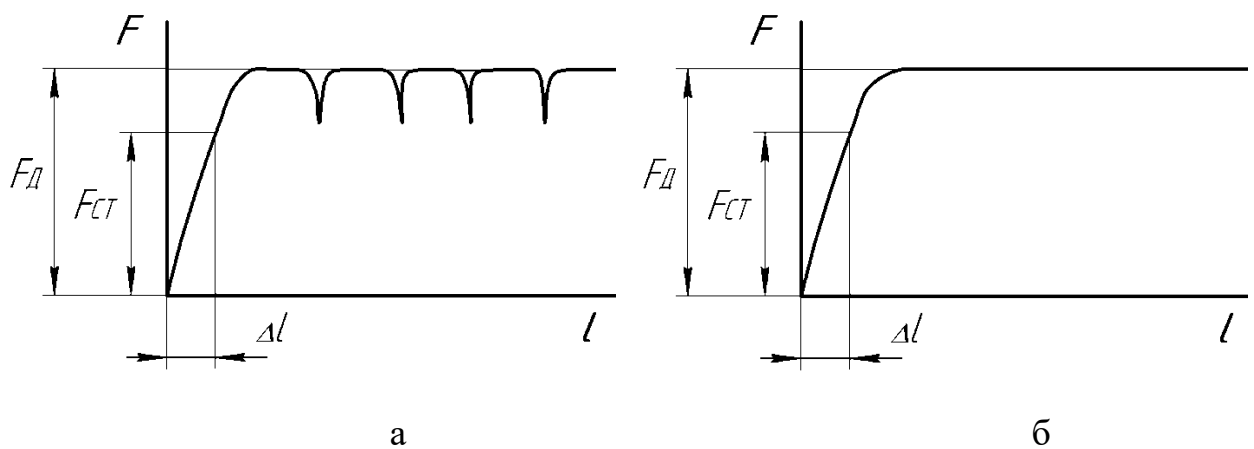


1 – кукурудза  $f_D$ ; 2 – кукурудза  $f_{CT}$ ; 3 – пшениця  $f_D$ ; 4 – пшениця  $f_{CT}$ ;  
5 – горох  $f_D$ ; 6 – горох  $f_{CT}$

Рисунок 4.19 – Динамічний і статичний коефіцієнти тертя культур в залежності від вологості

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.



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

Рисунок 4.20 – Характер зміни рушійної сили

Необхідно зазначити, що зі зміною навантаження коефіцієнти тертя практично не змінюються, так як при цьому відповідно змінюються зсувні сили  $F_{CT}$  та  $F_D$ . Наприклад для кукурудзи вологістю 10% при навантаженні  $F_N = 2,165\text{кг}$  –  $f_D = 0,25$ ,  $f_{CT} = 0,28$ , а при навантаженні  $F_N = 1,165\text{кг}$  –  $f_D = 0,239$ ,  $f_{CT} = 0,271$ .

#### 4.4 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. 4.20),

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  $50^\circ$ , 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 послідуочим 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.

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.



Рисунок 4.20 – Вигляд дослідної установки, завантаженої горохом

Швидкість потоку визначалась як:

$$g = \frac{Q}{h \cdot v}$$

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. 4.12. Характер траєкторії руху зерна та розширення потоку наведено на рис. 4.21.

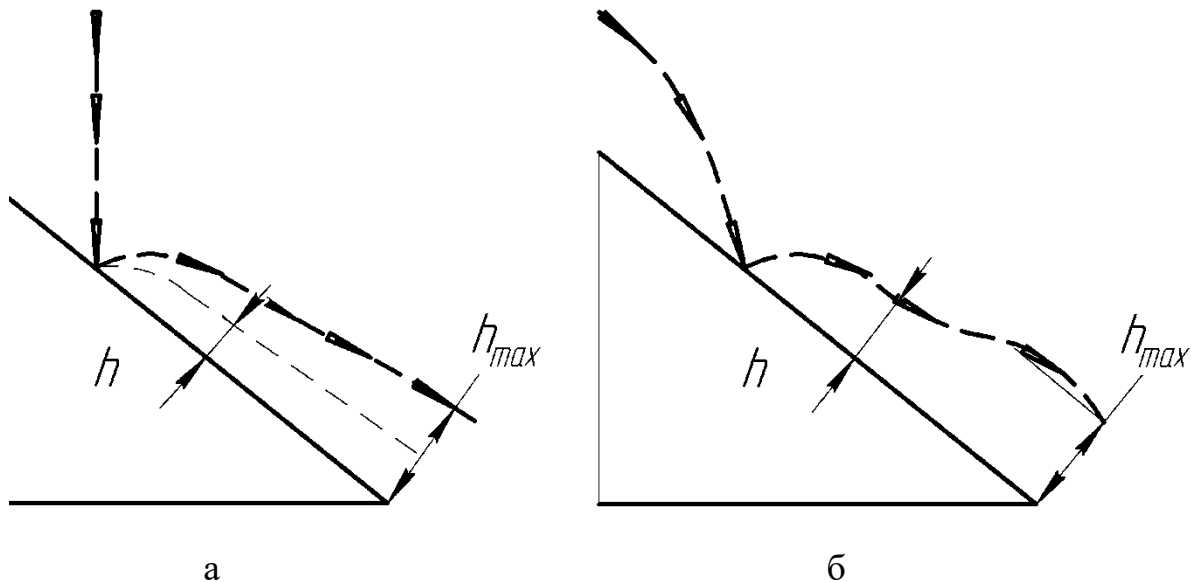


Рисунок 4.21 – Характер потоку при прямому падінні матеріалу (а) та при косому падінні (б)

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 [114–116], 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  $h_B \approx 1,45 \cdot h$ .

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:

$$g = \frac{Q \cdot g}{h \cdot A}, \quad (4.20)$$

$$h = \frac{Q \cdot g}{g \cdot A}, \quad (4.21)$$

де  $A$  – ширина робочої поверхні лотка.

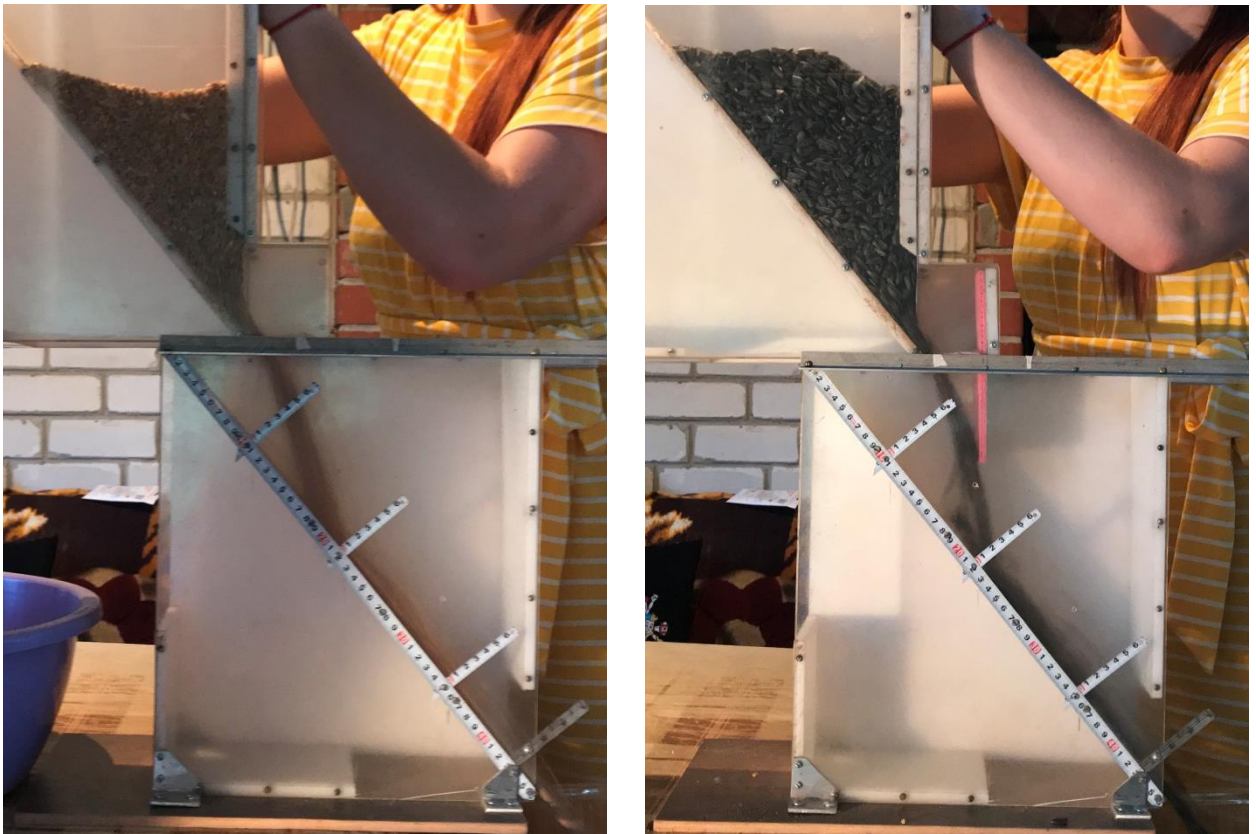


Рисунок 4.22 – Скріншоти відео потоку: пшениці при косому падінні та соняшника при прямому падінні

Таблиця 4.12 – 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	$K_h$
Кукурудза	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
Пшениця	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

Зараз у норіях виробниками застосовується здебільш пряма подача матеріала в живильний лоток (рис. 4.23, а), однак можливо створити і косу подачу, за рахунок нахилу живильної труби [117, 118]. В деяких норіях закордонних виробників випробують косу подачу (рис. 4.23, б) [119, 120].

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.



Рисунок 4.23 – 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.



#### 4.5 Висновки по розділу

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 осесиметричних 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 металоємності 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 на роботу в оптимальному режимі на ООО СП «Білий колодязь». Результати роботи випроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету у наступних дисциплінах: «Організація технологічного процесу

елеваторної промисловості», «Експлуатація та обслуговування машин ПХВ», «Проектування підприємств зберігання і переробки зерна», «Основи зберігання і переробки зерна».

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення науково-прикладної задачі, що виявляється в обґрунтуванні конструктивно-кінематичних параметрів завантаження ковшів зернових норій через із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів. Це дозволило підвищити продуктивність зернових норій та забезпечити стабільність заповнення завантаження ковшів.

Основні наукові результати виконаних досліджень полягають в наступному:

1. Проведеним узагальненням результатів відомих досліджень встановлено, що залишається не вирішеним завдання підвищення продуктивності зернових норій із забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів із урахуванням фізико-механічних властивостей зернових матеріалів. Статистичні методи визначення ефективних кутів внутрішнього тертя не відображають повністю процес взаємодії часток при зсуві. Процес зачерпування розглядався, як схема черпання одним ковшем, у той час як при роботі норії це реалізується послідовно групою ковшів з зовсім іншою схемою їх заповнення.

2. Вирішено науково-прикладну задачу, спрямовану на підвищення продуктивності зернових норій та забезпеченням стабільності заповнення завантаження ковшів шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних параметрів. Встановлено залежності дотичних напружень, кутових деформацій зернового шару та коефіцієнту опору зсуву від параметрів укосу, що на відміну від відомих враховують параметри внутрішнього зсуву. Аналітичними методами визначено коефіцієнт заповнення ковшів та коефіцієнтів опору при зачерпуванні з насипу та завантажені по ходу і проти ході тягового елемента, що враховують що на відміну від відомих враховує дотичні напруження, кутові деформації зернового шару та коефіцієнт опору.

3. 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. Значення відносної кутової деформації зсуву  $Y$  для пшениці  $Y = 0,520$ ; проса – 0,492; гороху – 0,487; сої – 0,477; ячменю – 0,563; вівсу – 0,446; жита – 0,590; гречки – 0,523; кукурудзи – 0,580; соняшнику – 0,450.

4. При запуску норії після завантаження бункера і утворення насипу відбувається заповнення ковшів, занурених в насип. Встановлено, що коефіцієнт зачерпування складає  $K_{зач} = 2,416$ , а загальний опір зачерпування –  $F_{дс} = 279,6$  Н. Запуск норії при порожньому бункері призводить до його тривалого заповнення і до тривалої роботи норії зі зниженою продуктивністю. Коефіцієнт зачерпування при сталому режимі роботи норії складає –  $K_{зач} = 1,748$ ; опір зачерпування  $F_{дп} = 202,2$  Н. Збільшення коефіцієнтів зачерпування при збільшенні швидкостей руху носить нелінійний зростаючий характер. При швидкостях понад 5 м/с різко зростає питома потужність приводу.

5. Всі зернові матеріали з вологістю  $W < 12,5\%$  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 зерна з вологістю 14% та вище.

6. При прямому падаючому потоці, через розширення живильного потоку, особливо для кулеподібних зернин (горох, соя), при лавиноподібному русі за рахунок відскоку, значна частина зерна може не потрапити в ковш. Коефіцієнт розширення потоку досягає значень  $K_H = 1,89-2,9$  для різних матеріалів, при косому падінні  $K_H = 1,15-1,2$ , в зв'язку з цим пряму подачу не

рекомендовано для сировини з вологістю  $W < 12\%$  та для кулеподібних зернин.

7. Граничний коефіцієнт опору зрушенню для пшениці з вологістю 14,8 % склав  $\lambda = 0,686$ ; кут зсуву (ефективний кут тертя по Е. Дженіке)  $\rho = 34^\circ 30'$ . Встановлено, що 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% –  $f_D = 0,34$ ,  $f_{CT} = 0,33$ .

8. Результати дослідження впроваджено на ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» (м. Карлівка) з економічним ефектом від впровадження у серійне виробництво 105 тис. грн. та ООО СП «Білий колодязь» з економічним ефектом 120 тис. грн. Результати роботи впроваджено у навчальний процес Державного біотехнологічного університету (ХНТУСГ ім. П. Василенка).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кісь Л. В. Енергетичні втрати в стрічково-барабанних механізмах норій-елеваторів. *Машинобудування. Збірник наукових праць УІПА*, 2017. Вип. 20. С. 6–10.

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

3. Oscillations with positional friction under mechanicals hock / [Vasyl Olshansky, Oleksii Bogomolov, Viktor Irklienko, Lilia Kys-Korkyshenko]. – *TeKa. Quarterly Journal of Agri-food Industry*, 2019. Vol. 19. № 1. P. 49–58.

4. V. I. Irklienko, O. V. Bogomolov, I. M. Lukivanov, L. V. Kis-Korkishchenko, P. S. Syromiatnikov. Developing environmentally friendly technology for wheat grain processing. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2021. Vol. 11(2). PP. 352-359. doi: 10.15421/2021\_122.

5. Кісь-Коркіщенко Л. В. Про пружні властивості та опір зсуву шару зернових матеріалів. *Науковий журнал «Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів»*, 2021. № 23. 2021 р. С. 65–69.

6. 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.

7. 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.

8. Богомолов О. В., Лук'янов І. М., Кісь Л. В. Особливості

д  
е  
ф  
о

*«Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (22-24 листопада 2017, м. Харків). Харків: НТУ ХПИ, 2017. С. 19–20.*

9. Кись Л. В., Богомолів О. О. К вопросу о загрузке сельскохозяйственных зерновых ковшовых элеваторов. *Матеріали XIV-го міжнародного форуму молоді. «Молодь і сільськогосподарська техніка у XXI сторіччі» (5-6 квітня 2018 р., м. Харків). Харків: ХНТУСГ ім. П.Василенка, 2018. С. 91.*

10. Богомолів О. В., Лук'янов І. М., Кись Л. В., Богомолів О. О. Підвищення ефективності роботи зернових норій. *Тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток харчових виробництв, ресторанного та готельного господарства і торгівлі: проблеми, перспективи, ефективність (м. Харків). Харків: ХДУХТ, 2018. С. 309–310.*

11. Богомолів О. В., Кись-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.*

12. Богомолів О. В., Лук'янов І. М., Кись-Коркіщенко Л. В. Заповнення норійних ковшів при зачерпуванні зернового матеріалу. *Тези доповідей III Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні аспекти розвитку обладнання харчової і готельної індустрії в умовах сучасності» (4-6 вересня 2019 р., м. Харків – м. Мелітополь – с. Кирилівка). ХДУХТ, ТДАТУ, 2019. С. 21–23.*

13. Богомолів О. В., Лук'янов І. М., Кись-Коркіщенко Л. В. Особливості структурних деформацій шару зернових матеріалів і їх вплив на опір зрушення. *Тези доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні напрямки технології та процесів переробних і харчових виробництв» (7-8 листопада 2019 р., м. Харків). Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2019.*

С. 61–62.

14. Богомолов О. В., Кісь-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.

15. 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.

16. 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.

17. Моделювання процесу здрібнення зернівки у робочий 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.

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

19. Филяков А. Б. О физической модели сыпучей среды. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2004. №1. С. 252–254.

20. Дженике Э. О. Складирование и выпуск сыпучих материалов. М. Мир. 1968. 164 с.



21. Schulze Dietmar. Storage and Discharge of Bulk Solids, 2016. P. 122. doi.org/10.1007/978-3-319-20949-4\_13.
22. Олейников А.И., Скачков М.Н. Модель уплотняемых сыпучих тел и некоторые ее приложения. *Информатика и системы управления*. 2011. №4. С. 48–57.
23. Меркулов И.И., Яушева С. В. Приближенный способ решения дифференциальных уравнений статики сыпучей среды. *Инженерные технологии и системы*. 2005. Т. 15. № 1. С. 15–21.
24. Прокофьев Н.М. Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок. М. ОНТИ Гостройиздат, 1963. 260с.
25. Мангушев Р. А., Карлов В. Д., Сахаров И. И. Механика грунтов. Издательство АСВ. 2000. 446 с.
26. Рычков В. А. Ковшовые элеваторы. Основы теории расчета параметров. ВНИИМС. Рязань. 2000. 101 с.
27. Nukulwar Masnaji. Material optimization and Modal Analysis of Elevator bucket. *International Journal of Current Engineering and Technology*, 2016. № 6. P. 574–583.
28. Прокофьев Н. М. Давление сыпучих тел и расчет подпорных стенок. М. ОНТИ Гостройиздат, 1963. 260 с.
29. Дерсевич Г. И. Механика зернистой среды. Проблемы механики. М. Вып. III. 1961. 368 с.
30. Платонов П. М. Исследование движения зерновых потоков: автореферат диссерт. докт. тех. наук. Московский технологический институт пищевой промышленности. 1960. 27 с.
31. Платонов П. М. Физико-механические свойства зерна в связи с автоматизацией технологических процессов. *Пищевое машиностроение*. 1960. № 3. С. 34–37.
32. 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.

33. Преснов О. М. Механика грунтов. Учебно-методическое пособие. Красноярск: Электронное издание, 2012. 111 с.

34. Фиалков Б. С. Птицын В. Г., Максименков Г. В. Управление истечением сыпучих материалов. Изд-во «Наука» Алма-Аты. 1981. 148 с.

35. Шубин И. Н., Свиридов М. М., Таров В. П. Технологические машины и оборудование. Сыпучие материалы и их свойства. Учебное пособие. Тамбов. Издательство ТГТУ, 2005. 76 с.

36. Карнаушенко Л. И. Критерии сыпучести порошкообразных материалов. *Изд. вузов. Пищ. техн*, 1989. № 2. С. 97–100.

37. Карнаушенко Л. И. Научные основы сдвига и слеживаемости сыпучих материалов в технологических процессах. Автореферат. дис. докт. техн. наук. Челябинск, 1986. 45 с.

38. Креймерман Г. Применение больших скоростей на элеваторных нориях. *Советское мукомолье и хлебопечение*. 1936. №6. С. 23-26.

39. Shatokhin I., Parfenov A. Advantages and disadvantages of high-speed bucket elevators as compared to the low-speed ones. *Forestry Engineering Journal*, 2015. № 4. P. 201–205. 10.12737/8473.

40. Волошин Е. В. Элеваторы и склады. Расчет основного технологического оборудования. Учебное пособие. Оренбург: Оренбургский государственный университет, 2019. 98 с.

41. Рычков В. А. Ковшовые элеваторы. Основы теории расчета параметров. ВНИИМС. Рязань, 2000. 101 с.

42. Залогин Н. Г., Кепеман Ф. Е., Воробьев В. Н. О механике свободного истечения сыпучих тел. *Инженерно-физический журнал*, 1960. том. III. №4. С. 18-21.

43. Schulze Dietmar. *Flow Properties of Powders and Bulk Solids*, 2014. 243 p.

44. Боуманс Г. Эффективная обработка и хранение зерна: перевод с английского В.Н. Даневского. М. ВО «Агропромиздат», 1991. 608 с.

45. Ламкин Г. Н. Исследование процесса загрузки зерновой норией: автореф. дис. канд. техн. наук. Челябинск, 1971. 17 с.
46. Xiong Xinhong, Gong Yuanhua, Wang Xiaoping, Dai Pengdan, Gong Xuelin. A design process to eliminate bucket-to-bucket interference on chain bucket elevator. *Advances in Mechanical Engineering*, 2016. № 8. P. 781–810. 10.1177/1687814016668104.
47. Кузьмин А. В., Марон Ф. Л. Справочник по расчетам механизмов подъемно-транспортных машин. Минск. Высшая школа, 1985. 350 с.
48. Галышев В., Тухвагулин М. Эффективная работа норией *Хлебопродукты*, 2000. № 8. С. 14–16.
49. Гофштенгель Г. Перемещение массовых грузов. М. Оргметалл, 1927. 136 с.
50. *Mechanics of materials* / Ferdinand Beer [et al.]. 6th ed. McGraw-Hill, 2012. 838 p.
51. Beumer B., Wehmeier K. Zur Frage des Schopfwiderstandes und der Auswurfverheltnisse bei Becherweren. *Fordern und Heben*, 1950. № 11. P. 110–118.
52. Готлиб В. Я. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса черпания и анализ некоторых условий работы цепных элеваторов: автореферат канд. техн. наук. Ленинград. 1966. 16 с.
53. К. В. Королев. Плоская задача теории предельного равновесия грунтов. М.:Наука, 2010. 251 с.
54. Крагельский И. В., Виноградова И. Э. Коэффициенты трения. Рипол Классик, 2013. 270 с.
55. Попов В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения: от нотрибологии до динамики землетрясений. Москва : Физматлит, 2013. 352 с.
56. Окопный Ю. А., Радин В. П., Чирков В. П. Механика материалов и конструкций. М.: Машиностроение, 2001. 408 с.
57. Таубер Б.А. Подъемно-транспортные машины. Учебник для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Экология, 1991. 528 с.

58. 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.

59. Мордасов Д. М., Мордасов М. М. Технические измерения плотности сыпучих материалов. Учебное пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. 80 с.

60. Borzony T., Hasley T., Eckel R. Two scenarios for avalanche dynamics in inclined granular layers. *Physical Review Letters*. BOOL. 2005. 84/20. P. 18.

61. Рева А. Ф. Совершенствование скорости истечения сыпучих сельскохозяйственных материалов из глубоких бункеров кормоцехов: дис. канд. техн. наук. зерноград. 2000. 139 с.

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

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

64. Григорян С. С. Об осесимметричном движении сыпучей среды. *Прикладная математика и механика*, 1987 Т. 21. Вып. 2. С. 138–143.

65. Іваненко Ф. В., Сінченко В. М. Технологія зберігання та переробки сільськогосподарської продукції: Навч.-метод. посіб. для самост. вивч. дисц. К.: КНЕУ, 2005. 221 с.

66. Гячев А. В. Келлер Г. Об основах теории истечения сыпучих материалов и некоторых результатов ее проверки. *Строительство и архитектура*, 1983. №9. С. 125–150.

67. Кунаков В. С., Савенков Д. С., Испанов В. В. Скорость истечения зерновых материалов из бункера с боковым выпускным отверстием. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*, 2014. №2. С. 73–75.

68. Shabana A. A. Dynamics of Multibody Systems. 2nd ed. Cambridge

University Press. Cambridge, 2003. 384 p.

69. Blundell M., Harty D. The Multibody System Approach to Vehicle Dynamics. Elsevier, 2004. 518 p.

70. Федосеев В. Б. Сухое и вязкое трение сыпучих тел. *Известия вузов. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки*, 2005. № 1. С. 93–96.

71. McBride W., Sinnott M., Cleary P. Discrete element modelling of a bucket elevator head pulley transition zone. *Granul. Matter*, 2011. № 13. P. 169–174.

72. H. Sachs. Opportunities for elevator energy efficiency improvements. *Technical report, American Council for an Energy-Efficient Economy Washington*, DC 2005. P. 1–11.

73. Ерохин М. Н., Казанцев С. П. Подъемно-транспортные машины. М.: Колос, 2010. 335 с.

74. 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.

75. Udovikova Svitlana, Akmen Viktoria, 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.

76. 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.

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

78. 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.

79. Иванченко Ф. К. Конструкция и расчет подъемно-транспортных

машин. Киев: Вища школа. Головное издательство, 1988. 424 с.

80. Abdulmazhidov Kh. Design and calculation of ground transport and technological machines, 2018. 10.18411/lj-09-2018-89.

81. 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.

82. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А., Попухин А. И. Подъемно-транспортные машины зерноперерабатывающих предприятий. М. Агропромиздат, 1985. 320 с.

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

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

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. ASTM E 112 – 10 Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 26 p.

89. Бондарев В. С., Дубинець О. І., Колісник М. П. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підйимальних і транспортувальних машин. Підручник для ВУЗів. Київ: Вища школа, 2009. 248 с.

90. Зуев Ф. Г., Лотков Н. А. Подъемно-транспортные установки: учебник

/ по направлению «Пищевая инженерия». Москва: КолосС, 2007. 465 с.

91. Лебедев А. Е., Зайцев А. Н., Богданов В. А. Метод определения коэффициента отражения частиц от отбойного элемента. *Современная наука и образование. Технические науки. Ярославский технический университет*, 2014. Вып. 6. С. 27–30.

92. 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.

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

94. Ловейкин В. С., Бортун 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.

95. Valevicius, R., Kacianauskas, R., Mroz, Z., Sielamowicz, I.: Discrete element method applied to multiobjective optimization of discharge of parameters in hoppers. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2006. 31(3). P. 163–175.

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

97. 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.

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

99. Бедич Т. В. Совершенствование процессов транспортирования зерна на основе применения полимерных материалов. *Наука*. Костанай. 2006. № 1. С. 121–125.

100. Бедич Г. В. К вопросу снижения травмируемости зерна в

загрузочной части норрии. *Наука*. Костанай. 2005. № 1. С. 4–10.

101 Федосеев В. Б. Исследование внутреннего трения пшеницы в зависимости от влажности. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия Естественные науки*. 2005. № 56. С. 14–18.

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

103. 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.

104. Perez-Aparicio, J. Bravo, R. Gomez-Hernandez. Optimal numerical design of bucket elevators using discontinuous deformation analysis. *Granul. Matter*, 2014. 16. P. 485–498.

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

106. 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.

107. Барышев А. И., Будишевский В. А., Складов 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.

108. Карнаушенко Л. И. Критерии сыпучести порошкообразных материалов. *Изд. вузов. Пищ. техн.* 1989. № 2. С. 97–100.

109. Philippe Pierre, Cuellar Pablo, Luu Li-Hua, Mena Sarah, Curtis Jennifer. Localized fluidization in a granular medium: Parametric study with a physical model of “sand boiling”. Teylor, 2016. 245 p. doi:10.1201/9781315375045-59.

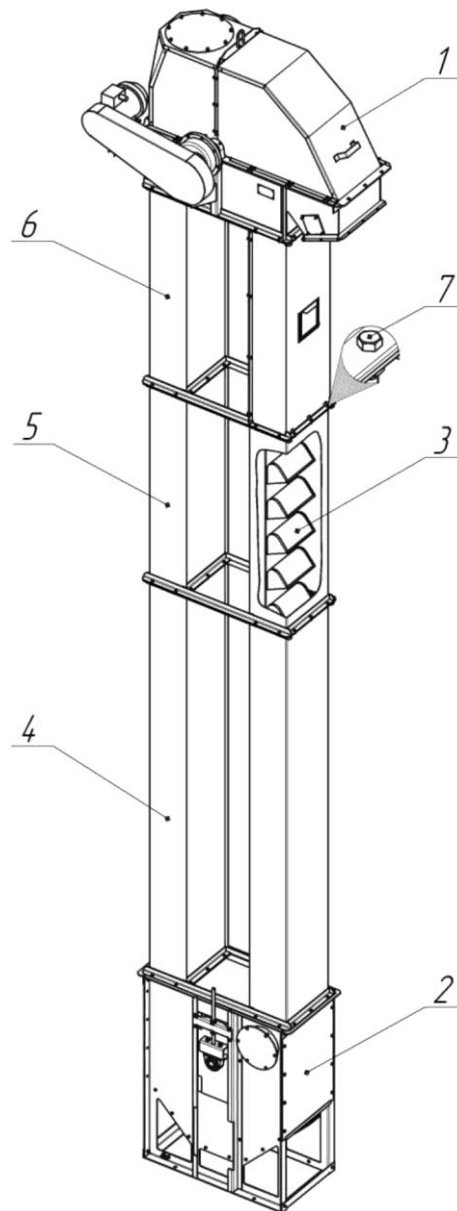
110. Усов К. А., Рычков В. А. Исследование ковшовых элеваторов без дна. *Сб. науч. труд. ВНИИПНАШ*. 1982. С. 34–42.



111. Beverly G.J., Roberts A. W., Hayes J. W. Mechanics of high speed elevator discharge. *Bulk Solids Handling*, 1983. Vol. 3. № 4. p. 853–859.
112. Рычков В. А., Зорин В. Ю. Метод теоретического расчета заполнения ковшей элеватора. *Сб. научн. трудов ВНИИПТИАгропром*. Рязань, 1984. С. 32–38.
113. Kaliniewicz, Zdzisław & Markowski, Piotr & Anders, Andrzej & Jadwisieńczyk, Krzysztof. Frictional properties of selected seeds. *Technical Sciences*, 2015. № 18. P. 85–101.
114. 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.
115. 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.
116. 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.
117. Beverley G., Roberts A., Hayes J. Mechanics of high speed elevator discharge. *Bulk Solids Handling*, 1983. 3(4), P. 853–859.
118. Jaskulski A. Methodology of multi-criteria optimization of appliances for vertical grain transportation. Ph.D. thesis, Warsaw University of Technology, 1992. 168 p.
119. Аржанов В. Г., Солунский Д. А., Тантлевский А. В. Повышение эффективности работы зерновых норий. *Промышленный транспорт*, 1985. № 10. С. 14–15.
120. 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.

ДОДАТКИ

## Додаток А Технічні характеристики норій Н-25, Н-50, Н-100



1 – станція приводна; 2 – станція натяжна; 3 – стрічка з ковшами; 4 – секція (довжина 2,5 м); 5 – секція (довжина 1,25 м); 6 – секція ремонтна; 7 – кріплення

Рисунок А.1 – Загальний вигляд норії

Норії стрічкові зернові одинарні з відцентрової розвантаженням ковшів призначені для вертикального переміщення зерна і продуктів його переробки.

Норії застосовуються на елеваторах, хлібоприймальних підприємствах, млинах та інших підприємствах агропромислового комплексу і харчової промисловості в технологічних і транспортних лініях.

Таблиця А.1 – Основні параметри і характеристики норії Н-25

Найменування параметру	Значення параметру			
Продуктивність*, т/год (не менше)	25			
Пошкодження зерна, % (не більше)	0,5			
Ємність ковша, дм <sup>3</sup>	1,6			
Ширина стрічки, мм	175			
Швидкість руху стрічки, м/с	2,4			
Напруга, В	380			
Частота напруги живлення, Гц	50			
Потужність електродвигуна, кВт	2,2	3	4	5,5
Максимальна висота підйому зерна, м	12,5	18,7	25	31,2
Маса, кг (не більше)	720	950	1200	1430
Габаритні розміри:				
– довжина, мм	1530	1530	1530	1530
– ширина, мм	675	675	675	675
– висота (max), мм	13390	19640	25890	32140

\* Значення продуктивності задано для пшениці з насипною щільністю 0,75 т/м<sup>3</sup>, вологістю до 11% та засміченістю до 10%.

Таблиця А.2 – Основні параметри і характеристики норії Н-50

Найменування параметру	Значення параметру					
Продуктивність*, т/год (не менше)	50					
Пошкодження зерна, % (не більше)	0,5					
Ємність ковша, дм <sup>3</sup>	2,6					
Ширина стрічки, мм	275...300					
Швидкість руху стрічки, м/с	2,4					
Напруга, В	380					
Частота напруги живлення, Гц	50					
Потужність електродвигуна, кВт	2,2	3	4	5,5	7,5	11
Максимальна висота підйому зерна, м	5	10	13,7	18,7	25	31,2
Маса, кг (не більше)	530	770	980	1210	1680	2030
Габаритні розміри:						
– довжина, мм	1530	1530	1530	1530	1810	1810
– ширина, мм	805	805	805	805	875	895
– висота (max), мм	5855	10855	14605	19605	26355	32605

\* Значення продуктивності задано для пшениці з насипною щільністю 0,75 т/м<sup>3</sup>, вологістю до 11% та засміченістю до 10%.

Таблиця А.3 – Основні параметри і характеристики норії Н-100

Найменування параметру	Значення параметру				
Продуктивність*, т/год (не менше)	100				
Пошкодження зерна, % (не більше)	0,5				
Ємність ковша, дм <sup>3</sup>	2,1 і 2,6; 1,8				
Ширина стрічки, мм	300				
Швидкість руху стрічки, м/с	2,4				
Напруга, В	380				
Частота напруги живлення, Гц	50				
Потужність електродвигуна, кВт	5,5	7,5	11	15	18,5
Максимальна висота підйому зерна, м	6,2	10	18,7	28,7	37,5
Маса, кг (не більше)	850	1090	1640	2270	2910
Габаритні розміри:					
– довжина, мм	1810	1810	1810	1810	1810
– ширина, мм	875	875	895	895	895
– висота (max), мм	7605	11355	20105	30105	38855

\* Значення продуктивності задано для пшениці з насипною щільністю 0,75 т/м<sup>3</sup>, вологістю до 11% та засміченістю до 10%.

Таблиця А.4 – Показники надійності норій

Параметр	Значення
Середнє напрацювання на відмову, год (не менше)	1400
Встановлений термін служби до першого капітального ремонту, р (не менше)	4
Встановлений термін служби, р (не менше)	10
Встановлене безвідмовне напрацювання, год (не менше)	400
Питома сумарна трудомісткість технічних обслуговування чол-год (не більше)	0,02

Норія поставляється заводом-виробником окремими вузлами і деталями в розібраному вигляді відповідно до доданої комплектувальної відомості.

Габаритні розміри приводних і натяжних станцій норій Н-25, Н-50 і Н-100 наведені на рис. А.2– А.4.

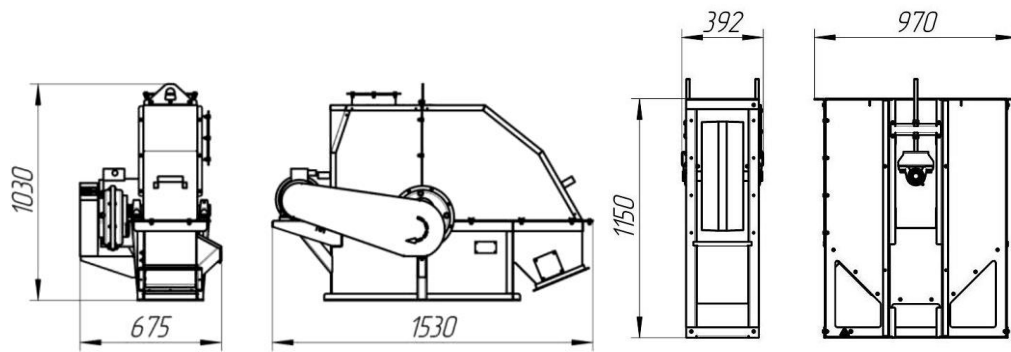


Рисунок А.2 – Габаритні розміри приводної та натяжної станції норії Н-25

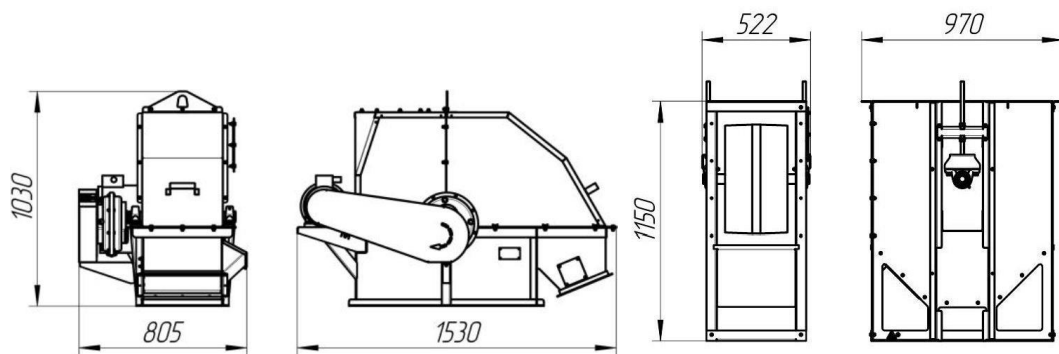


Рисунок А.3 – Габаритні розміри приводної та натяжної станції норії Н-50

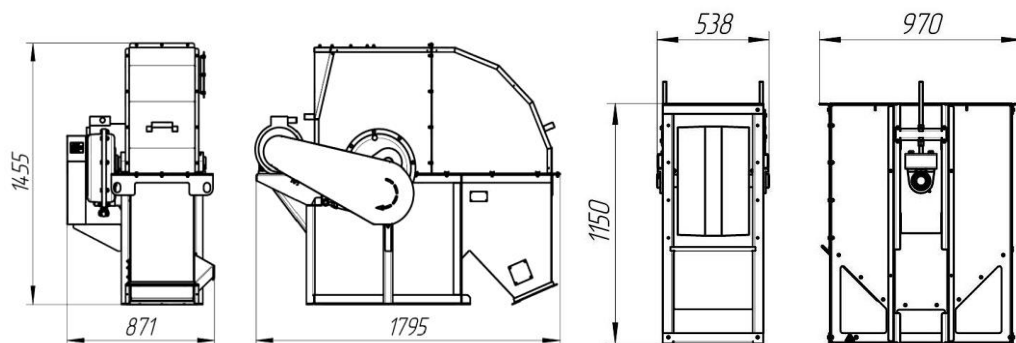


Рисунок А.4 – Габаритні розміри приводної та натяжної станції норії Н-100

До складу норії (рис. А.1) входять: станція привідна 1, станція натяжна 2, секції 4, 5, 6 та стрічка з ковшами 3.

Принцип роботи норії полягає у наступному. Насипний вантаж подається в завантажувальний вікно натяжної станції 2. Потім він зачерпується ковшами, закріпленими на безперервній норійній стрічці 3. Стрічка з завантаженими ковшами рухається до приводної станції по прямокутним норійні труб (секцій 4, 5, 6). У приводної станції, під дією

відцентрової сили вантаж вивантажується через розвантажувальний патрубок. Далі стрічка з порожніми ковшами повертається до натяжна станції для завантаження.

Висота норії утворюється набором приводний і натяжна станцій, а також секцій, що з'єднуються послідовно. Кількість секцій залежить від висоти підйому. Станції та секції з'єднуються між собою кріпленням 7.

Станція привідна (рис. А.2–А.4) складається з каркаса 1, кришок 2 і 3, приводного барабана 4, підшипникових опор 5 і приводу. Електродвигун 6 кріпиться болтами до каркаса станції. На вал приводного барабана змонтований редуктор 7, який пов'язаний з каркасом стяжкою 8. Від електродвигуна обертання за допомогою клинопасової передачі передається на швидкохідний вал редуктора. Натяг ременів здійснюється за допомогою стяжки, яка також виконує функцію моментного важеля.

Редуктор оснащено антиреверсним пристроєм, що забезпечує можливість обертання валу редуктора тільки в одному напрямку. Перевірку правильності підключення фаз на електродвигуні робити зі знятими ременями.

Додаток Б Технічні характеристики норій серії LBEВ виробництва Buhler

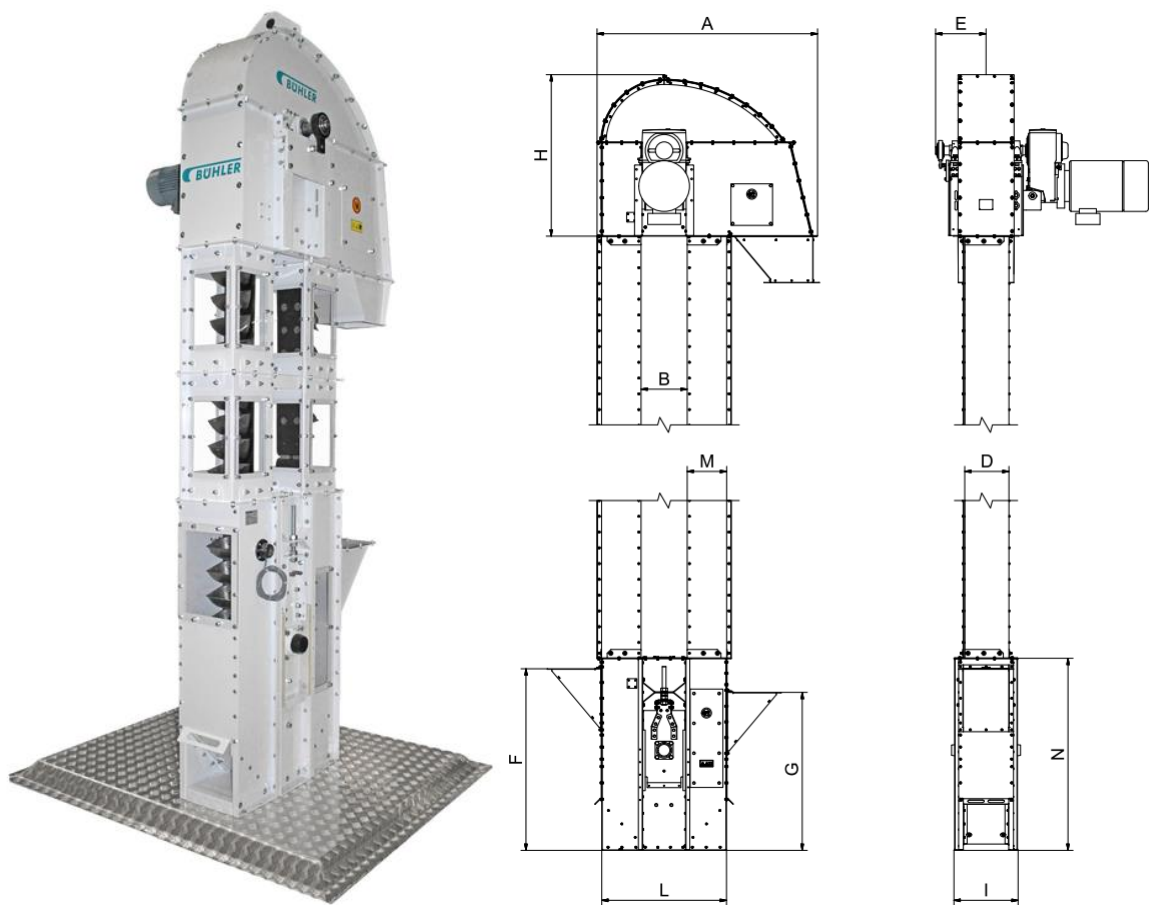


Рисунок Б.1 – Загальний вигляд та габаритні розміри норії серії LBEВ виробництва Buhler

Норії серії LBEВ виробництва Buhler поставляються в модульному виконанні, що дозволяє створювати власні компоувальні схеми та конфігурувати їх відповідно до потреб вашого підприємства. Стандартні розміри модулів та їх компактний корпус полегшують як відвантаження, так і доставку.

Зносостійкі плити стрічкової ковшової норії LBEВ облицьовані поліуретаном для захисту машини від зносу і продовження терміну її служби.

Стрічкова ковшова норія LBEВ має кілька захисних пристроїв для підвищення безпеки. Одне стежить за перегріванням підшипників. Датчик швидкості стежить за розривом стрічки та контролює її натяг. Датчик



сходження стрічки зупиняє норію, якщо стрічка зміщується із заданої траєкторії.

Технічні характеристики норій серії LBEВ виробництва Buhler наведено у табл. Б.1.

Таблиця Б. 1 – Технічні характеристики норій серії LBEВ виробництва Buhler

Тип	Продуктивність, т/год					Ковшів на 1 м.п. / Ковшів в ряду	Потужність, кВт	Макс. висота
	2,0 м/с	2,4 м/с	2,8 м/с	3,1 м/с	3,3 м/с			
360/170	37	44	50	/	/	10/1	7,5	45
630/170	37	44	50	57	60		15	70
400/225	67	80	90	100	/	8,5/1	15	55
630/225	67	80	90	100	110		22	70
500/280	100	120	140	150	/	7,4/1	22	55
800/280	100	120	140	150	166		37	70
500/315	120	145	170	190	200	7,4/1	30	55
800/315	120	145	170	190	200		45	70
630/400	180	225	260	290	300	5,88 /1	45	55
1000/400	180	225	260	290	300		75	70
630/550	280	305	355	395	420	5,88 /1	75	45
1000/550	280	305	355	395	420		132	70

## Додаток В Тарировочна залежність

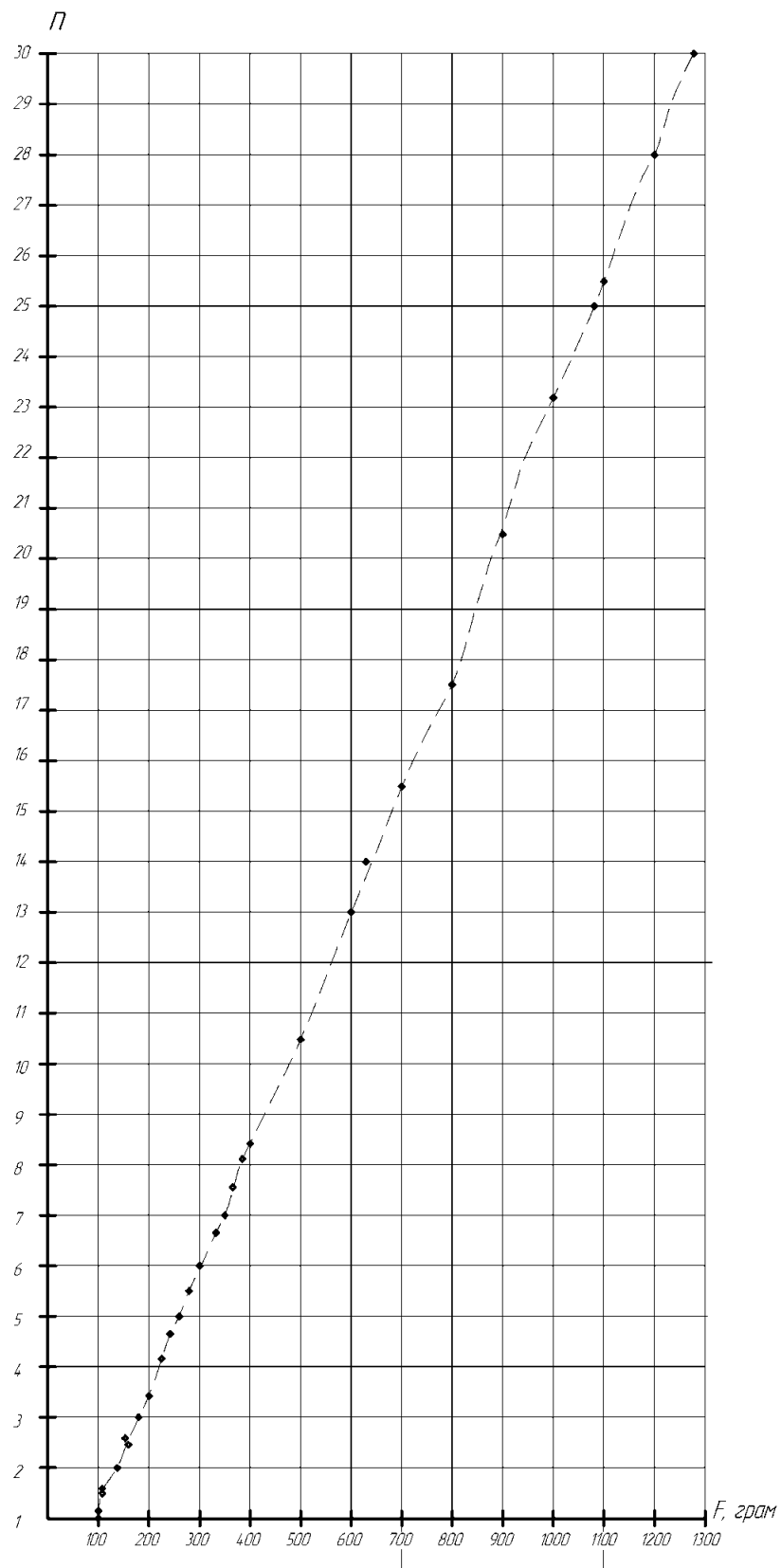


Рисунок В.1 – Тарировочна залежність

## Додаток Г Акти впровадження результатів дисертаційного дослідження



**АКТ**  
**про впровадження результатів**  
**закінченої науково-дослідної роботи**

Відповідно до спільної науково-дослідної роботи Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка та ПрАТ «Карлівський машинобудівний завод» (м. Карлівка) результати за напрямком «Обґрунтування раціональних параметрів завантаження ківшів зернових норій» (виконавці проф. Богомолів О.В., асистент Л.В. Кісь-Коркіщенко) у вигляді закінченої методики передані та запроваджені при виробництві транспортуючих машин та проектуванні елеваторів.

Спільна виробнича перевірка встановила ефективність роботи норій при транспортуванні зернового матеріалу за рахунок підвищення якості завантаження.

Нові робочі органи норій з обґрунтованими параметрами можуть бути виготовлені під замовлення. Річний економічний ефект від впровадження результатів роботи у серійне виробництво складає 105 тис. грн.

Керівник групи конструкторів  
ПрАТ «Карлівський машинобудівний  
завод»

Борщ Ю.П.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
 ООО СП «Білий колодязь»  
 Щербань С.В.  
 “20” квітня 2021 г.  
 М.П.



## А К Т

### про впровадження закінченої науково-дослідної, дослідно-конструкторської роботи (потрібне підкреслити)

Ми, що нижче підписалися, представник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка в особі керівника науково-дослідної (дослідно-конструкторської) роботи \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 доктора. техн. наук, проф. Богомолова О.В.  
 та представника ООО СП «Білий колодязь»

\_\_\_\_\_ (найменування організації, підприємства)  
 в особі Щербань С.В.  
 склали дійсний акт про те, що результати науково-дослідної (дослідно-конструкторської) роботи на тему: Обґрунтування раціональних параметрів завантаження ківшів зернових норій з відцентровим навантаженням  
 \_\_\_\_\_  
 яка виконана кафедрою (лабораторією) «Обладнання та інжиніринг переробних і харчових виробництв» \_\_\_\_\_ В  
 період з 01.02.2020 до 01.03.2021  
 впроваджені на ООО СП «Білий колодязь»

\_\_\_\_\_ (підприємство, організація)  
 \_\_\_\_\_ шляхом Уточнення конструктивно  
 \_\_\_\_\_ (місяць рік)  
Відцентрове навантаження норій та обґрунтування параметрів завантаження ківшів  
 \_\_\_\_\_ (вказати, в чому втілюється впровадження)

з впровадженням винаходу згідно а-с № патент на корисну модель 130397 від 10.12.18 р.

Впровадження результатів досліджень дає можливість підприємству (організації) отримати наступний техніко-економічний ефект, який полягає в підвищенні якості завантаження ківшів зернових норій. Економічний ефект від впровадження роботи складає 120000 грн (сто двадцять тисяч гривень).

Зауваження та пропозиції про подальшу роботу по впровадженню \_\_\_\_\_

Продовжити науково-дослідні роботи по вдосконаленню та розробці нових робочих органів зернових норій.

Представник  
підприємства, організації  
роботи

Щербань С. В.

" 20 " квітня 2021 р.

Представник,  
науковий керівник

О.В. Богомолов

" 20 " квітня 2021 р.

**Виконавці:**

Л.В. Кісь-Коркіщенко



**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Ректор Харківського національного  
технічного університету сільського  
господарства імені Петра Василенка



О. В. Нанка  
2021 р.

**АКТ**

про впровадження у навчальний процес результатів дисертаційної роботи

**Кісь-Коркіщенко Лілії Вікторівни**

Комісія у складі: проректора з науково-педагогічної роботи канд. екон. наук, доц. Заїки Світлани Олександрівни та керівника навчального відділу канд. техн. наук, доц. Бережної Наталії Георгіївни встановила, що основні результати дисертаційної роботи Кісь-Коркіщенко Л. В. впроваджено у навчальний процес Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка у наступних дисциплінах:

– для студентів спеціальності «133 – Галузеве машинобудування» – в лекційний курс «Організація технологічного процесу елеваторної промисловості», загальним обсягом 90 год. та лекційний курс «Експлуатація та обслуговування машин ПХВ», загальним обсягом 90 год.;

– для студентів спеціальності «181 – Харчові технології» – в лекційний курс «Проектування підприємств зберігання і переробки зерна», загальним обсягом 120 год. та лекційний курс «Основи зберігання і переробки зерна», загальним обсягом 150 год.

Проректор  
з науково-педагогічної роботи

С. О. Заїка

Керівник навчального відділу

Н. Г. Бережна