

УДК 621.928.3.532.5

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0405>**Богдан Коробко,**

доктор технічних наук,

професор кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Першотравневий пр. 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>E-mail: korobko@nupp.edu.ua**Олександр Левченко,**

аспірант спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»,

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Першотравневий пр. 24, м. Полтава, 36011, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3191-7097>E-mail: pbuidceh@gmail.com**ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ПРИЙМАЛЬНОГО БУНКЕРА ПІД ЧАС СКЛЕПІННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ**

АНОТАЦІЯ. У статті розглядається актуальна проблема, що значно впливає на ефективність роботи бетонозмішувальних підприємств – утворення склепінь у приймальних бункерах. Це явище призводить до непередбачуваних зупинок виробничого процесу, зниження продуктивності обладнання та збільшення витрат на обслуговування. Проведений аналіз сучасних методів боротьби з склепінням показав їхню обмежену ефективність. Вібраційні та пневматичні системи, які широко застосовуються на сьогоднішній день, не завжди здатні повністю усунути проблему, особливо при зміні властивостей сипких матеріалів або геометричних параметрів бункерів. З метою підвищення надійності та продуктивності бетонозмішувальних установок запропоновано новий підхід, що передбачає використання спеціального розпушувача. Цей пристрій оснащений механічними елементами, які дозволяють ефективно руйнувати склепіння в зоні вихідного отвору бункера, забезпечуючи безперервний потік матеріалу. Впровадження спеціального розпушувача на бетонозмішувальних підприємствах дозволить підвищити якість готової продукції, знизити собівартість виробництва та забезпечити стабільну роботу підприємства. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації конструкції приймальних бункерів та розробки нових технологій переробки сипких матеріалів.

Ключові слова: склепіння; сипкі матеріали; приймальний бункер; розпушувач; геометрія бункера; транспортування матеріалів; бетонний завод; бетон; фізико-механічні властивості.

OPTIMIZATION OF THE RECEIVING BUNKER OPERATION DURING THE BLOCKING OF BULK MATERIALS

ABSTRACT. The article discusses an urgent problem that significantly affects the efficiency of concrete mixing enterprises - the formation of vaults in receiving bunkers. This phenomenon leads to unpredictable shutdowns of the production process, reduced equipment productivity and increased maintenance costs. The analysis of modern methods of dealing with the vault showed their limited effectiveness. Vibration and pneumatic systems, which are widely used today, are not always able to completely eliminate the problem, especially when changing the properties of bulk materials or the geometric parameters of hoppers. In order to increase the reliability and performance of concrete mixing plants, a new approach has been proposed, which involves the use of a special ripper. This device is equipped with mechanical elements that allow you to effectively destroy the vault in the area of the hopper outlet, ensuring a continuous flow of material. The introduction of a special ripper at concrete mixing plants will improve the quality of finished products, reduce the cost of production and ensure the stable operation of the enterprise. The results obtained can be used to optimize the design of receiving bins and develop new technologies for processing bulk materials.

Keywords: vault; bulk materials; receiving bunker; breaker; bunker geometry; material transportation; concrete plant; concrete; physical and mechanical properties.

1. Постановка проблеми. У сучасному будівництві бетон є одним із ключових матеріалів, який широко застосовується у різних технологічних процесах. Ефективне виробництво бетонних сумішей значною мірою залежить від надійності та безперебійності роботи обладнання бетонозмішувальних заводів. Одним із важливих елементів таких систем є приймальні бункери, які забезпечують накопичення та подачу сипких матеріалів для подальшого змішування.

Однак, у процесі експлуатації бункерів нерідко виникає явище склепіння сипких матеріалів, яке суттєво ускладнює їх функціонування. Склепіння проявляється у вигляді формування нерухомих арок із частинок матеріалу, що перешкоджають його нормальному вивантаженню. Це призводить до порушення безперервності технологічного процесу, збільшення часу простоїв та додаткових витрат на усунення блокувань.

Актуальність дослідження явища склепіння обумовлена необхідністю підвищення надійності та продуктивності технологічного обладнання на бетонних заводах. Ефективне вирішення проблеми забезпечить стабільність роботи бункерів, скоротить експлуатаційні витрати та мінімізує вплив людського фактора.

2. Аналіз останніх джерел і публікацій. Явище склепіння сипких матеріалів у бункерах є об'єктом досліджень багатьох учених, оскільки його розуміння і контроль мають важливе значення для різних галузей промисловості, включаючи будівельну. У сучасній науковій літературі приділяється значна увага вивченню фізичних та механічних властивостей сипких матеріалів, які впливають на утворення склепіння [1].

Вагомий внесок у теоретичне описання поведінки сипких матеріалів зроблено в роботах, присвячених моделюванню потоків за допомогою методів механіки суцільних середовищ [2-3]. Дослідники підкреслюють, що утворення склепіння є результатом взаємодії між частинками матеріалу та стінками бункера, що формує статичну структуру у вигляді арки. Для опису цього явища широко використовуються математичні моделі, які враховують розподіл напружень і сил у масиві сипкого матеріалу.

У ряді публікацій [4-6] досліджується вплив геометричних параметрів бункера, таких як кут нахилу стінок і діаметр вихідного отвору, на ймовірність склепіння. Результати досліджень свідчать, що оптимізація цих параметрів може знизити частоту виникнення блокувань, проте не усуває проблему повністю. Зокрема, експериментальні дослідження підтверджують, що навіть за сприятливих умов існують матеріали, які демонструють високу схильність до утворення склепіння через їх специфічні фізичні властивості.

У галузі інженерних рішень розглядаються різні методи боротьби зі склепінням. Одним із найпоширеніших підходів є використання вібраційних механізмів, які створюють коливання, здатні руйнувати статичні структури в масиві матеріалу [7-9]. Однак численні дослідження вказують на те, що ефективність таких пристроїв залежить від частоти і амплітуди вібрацій, а також від характеристик самого матеріалу. У багатьох випадках застосування вібраційних систем виявляється недостатньо ефективним або супроводжується підвищеним енергоспоживанням і зносом обладнання.

Серед інших рішень, заслуговує уваги використання пневматичних систем, які подають стиснене повітря до зони вихідного отвору бункера [10]. Цей підхід має переваги в певних умовах, але його недоліками є складність технічного обслуговування та потреба у додаткових ресурсах, що обмежує його застосування в практичних умовах.

Попри значний прогрес у розумінні явища склепіння, залишається низка невирішених питань. Більшість існуючих моделей і методик спрямовані на вирішення проблем для окремих типів матеріалів і не враховують широкий спектр умов експлуатації бункерів.

3. Мета роботи. Метою цієї статті є дослідження явища склепіння сипких матеріалів у приймальних бункерах бетонних заводів, визначення фізичних закономірностей його утворення та розробка ефективного способу ліквідації цієї проблеми. Особлива увага приділяється аналізу впливу фізико-механічних властивостей сипких матеріалів, геометричних параметрів бункера та умов експлуатації на процес утворення склепіння.

4. Обговорення результатів досліджень. Процес виготовлення бетону на бетонозмішувальних заводах (рис. 1) є складним і багатоступеневим технологічним циклом, який спрямований на отримання високоякісного матеріалу, що відповідає вимогам будівельних стандартів. Основними етапами цього процесу є прийом, зберігання і дозування компонентів, змішування, контроль якості та транспортування готової бетонної суміші. Кожен із цих етапів має свої особливості та впливає на кінцеві властивості бетону.

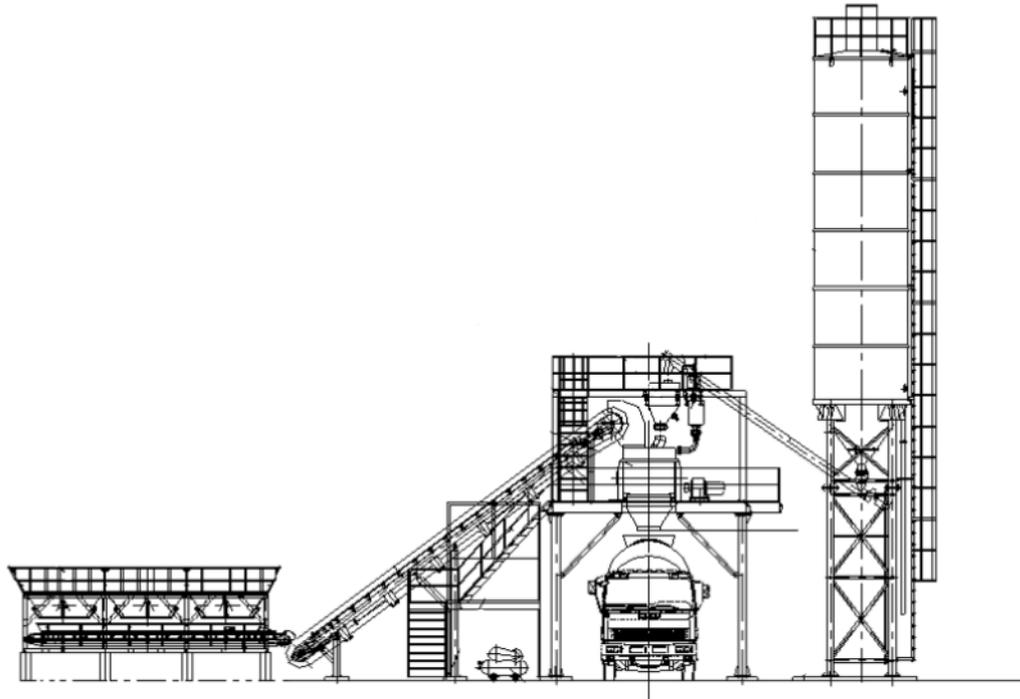


Рис. 1. Схема бетонного заводу
Fig. 1. Concrete plant scheme

На початковій стадії виготовлення бетону на заводі здійснюється прийом та зберігання сировинних матеріалів, які включають цемент, наповнювачі (щебінь, пісок), воду та хімічні добавки. Наповнювачі доставляються на завод вантажними автомобілями і вивантажуються в приймальні бункери. Після цього матеріали проходять контроль якості, щоб забезпечити відповідність їх характеристик заданим параметрам.

Зберігання сировини на заводі організоване таким чином, щоб запобігти її псуванню та забезпечити зручність у подальшому використанні. Цемент зберігається у спеціальних силосах, захищених від впливу атмосферної вологи, що запобігає його злежуванню. Щебінь і пісок накопичуються у відкритих або закритих складах, залежно від кліматичних умов регіону та можливостей заводу. Хімічні добавки зберігаються у герметичних контейнерах, які захищають їх від забруднення і втрати активності.

Наступним важливим етапом є дозування компонентів, яке здійснюється згідно з рецептурою бетонної суміші. Точність дозування є критичною для забезпечення потрібних характеристик бетону, таких як міцність, рухливість і довговічність. Для цього на заводах використовуються автоматизовані системи, які контролюють подачу кожного компонента. Вагові дозатори забезпечують високу точність дозування цементу, наповнювачів і добавок, тоді як для води застосовуються об'ємні або масові витратоміри.

Наступним етапом є змішування компонентів, від якого залежить однорідність і якість готової суміші. У більшості бетонозмішувальних заводів використовуються гравітаційні або примусові бетонозмішувачі. Гравітаційні змішувачі забезпечують перемішування компонентів за рахунок обертання барабана, тоді як у примусових змішувачах для цього застосовуються спеціальні лопати або змішувальні органи [11]. Тривалість змішування визначається залежно від типу обладнання, властивостей компонентів і вимог до якості бетону.

У процесі змішування важливо досягти рівномірного розподілу частинок цементу, води і наповнювачів у бетонній масі. Для цього рецептура коригується залежно від умов роботи заводу. Крім того, на цьому етапі можуть додаватися спеціальні добавки, які покращують властивості бетону, такі як пластифікатори, які підвищують рухливість суміші, або прискорювачі, які зменшують час твердіння.

Контроль якості бетону здійснюється на кожному етапі виробничого процесу, щоб забезпечити відповідність готової суміші проектним характеристикам. У лабораторіях заводів проводяться випробування бетону на міцність, рухливість і водонепроникність. Для цього використовуються зразки, які відбираються безпосередньо з виробничої лінії. Крім того, проводиться контроль параметрів змішування, таких як вологість наповнювачів і кількість доданої води.

Після виготовлення бетонна суміш транспортується до місця будівництва. Для цього використовуються автобетонозмішувачі, які забезпечують постійне перемішування матеріалу, запобігаючи його розшаруванню і втраті властивостей. Важливо, щоб час доставки не перевищував встановлених норм, оскільки це може негативно вплинути на якість бетону через початок процесу тужавлення.

Ключовим аспектом у роботі сучасних бетонозмішувальних заводів є автоматизація виробничих процесів. Використання комп'ютеризованих систем управління дозволяє не лише підвищити точність дозування і змішування, але й зменшити вплив людського фактора. Такі системи контролюють усі етапи виробництва в режимі реального часу, забезпечуючи своєчасне виявлення відхилень і коригування параметрів.

Під час процесу дозування, коли сипкі компоненти повинні рівномірно переміщатися до змішувального вузла, виникає одна з основних проблем – формування склепіння у приймальних бункерах. Це явище стає критичним, оскільки воно порушує безперервність виробничого процесу, впливає на точність дозування компонентів і, зрештою, на якість готового бетону.

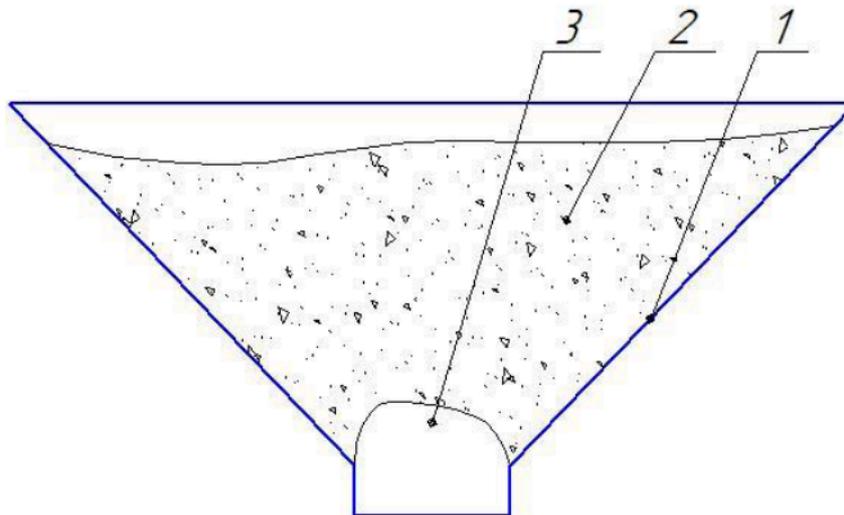


Рис. 2. Явище склепіння:

1 – бункер; 2 – сипкий матеріал; 3 – склепіння

Fig. 2. The phenomenon of vaulting:

1 – bunker; 2 – bulk material; 3 – vaulting

Процес утворення склепіння сипких матеріалів у бункері (рис. 2) розпочинається з моменту, коли матеріал під дією сили тяжіння починає рухатися до вихідного отвору. У цьому процесі між частинками матеріалу та між частинками і стінками бункера виникають сили тертя, зчеплення та опору. Ці сили можуть перевищувати вагу частинок, створюючи стабільну структуру, яка блокує подальший рух матеріалу. Така структура зазвичай має форму арки або склепіння, яка утримується за рахунок рівноваги між внутрішніми напруженнями в матеріалі та зовнішнім впливом.

У бункері сипкі матеріали зазвичай зберігаються у насипному стані. Вони утворюють масив, у якому частинки взаємодіють одна з одною під дією ваги та сил тертя. Коли матеріал починає рухатися до вихідного отвору, його частинки перебудовуються, формуючи канали або зони з більш щільною структурою. Ці зони можуть залишатися стабільними через взаємне блокування частинок або через тертя об стінки бункера.

Особливістю склепіння є його локальне утворення в зоні вихідного отвору бункера. Саме там концентрація сил, які діють на матеріал, є найвищою. Зона склепіння може розширюватися вгору, формуючи область, де матеріал перестає рухатися. Це явище найбільш характерне для матеріалів із високим коефіцієнтом тертя або значною однорідністю частинок.

Геометрія бункера значною мірою визначає ймовірність утворення склепіння та ефективність транспортування сипких матеріалів. Кут нахилу стінок α визначає, чи зможе матеріал долати сили тертя між частинками та рухатися до вихідного отвору. Якщо кут нахилу менший за кут природного укосу матеріалу θ , частинки стабілізуються, і потік припиняється. У таких випадках формуються локальні зони застою, які можуть спричинити склепіння [6].

Критичним параметром також є розмір вихідного отвору. Якщо цей розмір недостатньо великий відносно гранулометричного складу матеріалу, утворення склепіння стає неминучим. Форма отвору впливає на рівномірність потоку: круглі отвори мають тенденцію краще зменшувати ймовірність застою, ніж прямокутні або звужені [12].

З урахуванням цих факторів критичний діаметр вихідного отвору, який забезпечує безперебійний потік матеріалу можна описати формулою:

$$D_{crit} = k \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot \tan(\alpha)}{\sigma_t \cdot \mu_s}, \quad (1)$$

де: k — коефіцієнт, що враховує форму вихідного отвору; ρ — насипна щільність матеріалу; g — прискорення вільного падіння; H — висота шару матеріалу в бункері; α — кут нахилу стінок бункера; σ_t — межа текучості матеріалу; μ_s — коефіцієнт тертя матеріалу об стінки бункера.

Фізичні властивості сипких матеріалів впливають на те, як саме утворюється склепіння. Матеріали з високою вологістю мають схильність до злежування через капілярні сили, які зв'язують частинки. Для капілярних матеріалів критичну вологість, за якої склепіння утворюється найшвидше, можна визначити через залежність від гранулометричного складу та поверхневого натягу:

$$w_{crit} = \frac{2 \cdot \sigma_w}{\rho \cdot g \cdot d}, \quad (2)$$

де: d — середній діаметр частинок; σ_w — поверхневий натяг рідини; ρ — насипна щільність.

У сухих матеріалів ключовим параметром є коефіцієнт тертя μ і гранулометричний склад. Матеріали з дрібною фракцією мають більшу питому площу контакту, що підвищує загальний опір руху. Для грубозернистих матеріалів на перший план виходить сила механічного блокування.

Крім властивостей матеріалу, важливим фактором є його початковий стан у бункері. Якщо матеріал насипаний нерівномірно або під час завантаження виникли зони локальної ущільненості, це може сприяти швидшому утворенню склепіння під час вивантаження. Такі нерівномірності впливають на розподіл напружень у матеріалі, створюючи зони з підвищеним опором руху частинок [5]. Для оцінки цього важливо визначити вертикальні (σ_v) і горизонтальні (σ_h) напруження в бункері:

$$\sigma_v = \frac{\rho \cdot g \cdot H}{1 + \frac{2 \cdot \mu_s}{D}}, \quad (3)$$

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v, \quad (4)$$

де: H – висота шару матеріалу; D – ширина або діаметр бункера; K – коефіцієнт бокового тиску.

Склепіння також може формуватися через недостатню швидкість руху матеріалу на транспортуючу стрічку. Якщо матеріал починає витікати занадто повільно, його частинки мають більше часу для стабілізації і взаємного блокування. Це характерно для ситуацій, коли діаметр вихідного отвору бункера є меншим за розмір зерен сипкого матеріалу, що призводить до механічного блокування частинок у вихідній зоні.

Визначальною умовою утворення склепіння є досягнення рівноваги, за якої сили, що утримують матеріал у стабільному стані, перевищують сили, що сприяють його руху.

Основний математичний вираз для стійкості склепіння має вигляд:

$$\sum F = F_g - F_t - F_c - F_s = 0, \quad (5)$$

де: F_g – сила тяжіння; F_t – сила тертя між частинками; F_c – сили когезії між частинками; F_s – сила опору, створена стінками бункера.

Усунути проблему утворення склепіння сипких матеріалів у приймальному бункері можна завдяки встановленню спеціального розпушувача у якого головним елементом системи є вал із робочими органами, які обертаються всередині бункера в зоні розвантажувального отвору Цей пристрій забезпечує активне руйнування склепіння за рахунок механічного впливу на матеріал у зоні вихідного отвору бункера.

Принцип дії розпушувача полягає у створенні механічних коливань та переміщень матеріалу, які запобігають його ущільненню та злежуванню. Робочі органи, обертаючись разом із валом, руйнують структурні зв'язки між частинками матеріалу, завдяки чому запобігається утворення стійких структур, характерних для склепіння. Цей процес супроводжується зменшенням тертя між частинками та збільшенням рухомості матеріалу, що забезпечує його безперервний потік на стрічковий транспортер.

На рисунку 3 позначено два ключових параметри, які мають вплив на ефективність роботи розпушувача: розмір розвантажувального отвору H і умовний розмір отвору H_u . Ці параметри визначають площу вихідного перетину, через який матеріал потрапляє на транспортер. Якщо H є недостатнім, склепіння може блокувати потік матеріалу, навіть за активної роботи розпушувача. Відповідно, під час проектування бункера та розпушувача враховуються як фізичні властивості матеріалу, так і необхідний обсяг пропускної здатності.

У процесі роботи вал із робочими органами, обертаючись, генерує механічні зусилля, які передаються на частинки матеріалу, що знаходяться в зоні вихідного отвору. Ці зусилля спрямовані на подолання статичного тертя між частинками, а також на руйнування міцних зв'язків, які можуть утримувати структуру склепіння. За допомогою таких дій робочі органи забезпечують постійне переміщення частинок, перешкоджаючи їхньому злежуванню та ущільненню.

Особливістю роботи розпушувача є взаємодія з матеріалом у двох зонах: у верхній частині бункера, де матеріал починає стікати до розвантажувального отвору, і в самій зоні отвору, де формується потік. У верхній зоні забезпечується руйнування потенційних зон злежування, а в нижній – активне підтримання стабільного потоку матеріалу. Таким чином, механічний вплив розпушувача охоплює весь об'єм матеріалу, що знаходиться в зоні дії робочих органів.

Під час роботи важливим аспектом є контроль швидкості обертання вала. Надмірна швидкість може призводити до пошкодження частинок матеріалу або підвищення пилоутворення, тоді як недостатня швидкість не забезпечить ефективного руйнування склепіння. Тому швидкість обертання регулюється відповідно до властивостей матеріалу та вимог до продуктивності.

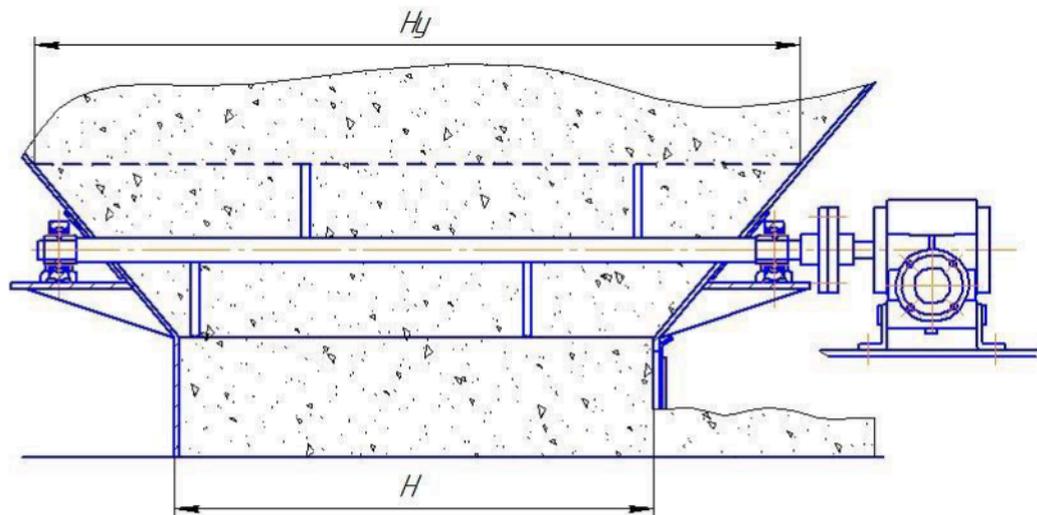


Рис. 3. Розпушувач в процесі роботи:

H – розмір розвантажувального отвору; H_y – умовний розмір розвантажувального отвору

Fig. 3. The ripper in operation:

H – the size of the discharge opening; H_y – the nominal size of the discharge opening

Крім того, геометрія робочих органів і їхнє розташування на валу мають вирішальне значення для ефективної роботи розпушувача. На рисунку видно, що робочі органи розташовані вздовж усього валу, що забезпечує рівномірний вплив на матеріал по всій ширині розвантажувального отвору. Це важливо для запобігання утворенню локальних зон застою матеріалу, які можуть знижувати загальну ефективність системи.

Якщо позначити силу, що створюється робочими органами розпушувача, як F_r , то склепіння руйнується, коли виконана умова:

$$F_r \geq F_t + F_a + F_c, \quad (6)$$

де: F_a - сила адгезії; F_c - сила зчеплення між частинками.

Сила F_r залежить від геометрії розпушувача та його режиму роботи. Вона може бути виражена через момент обертання M , радіус дії робочих органів R та кількість робочих органів n :

$$F_r = \frac{M}{R \cdot n}, \quad (7)$$

Момент обертання M , у свою чергу, визначається передаточним співвідношенням редуктора, потужністю приводу P та кутовою швидкістю ω :

$$M = \frac{P}{\omega}, \quad (8)$$

Додатково враховується динамічний вплив робочих органів розпушувача, який генерує пульсуючі сили, змінюючи рівноважний стан склепіння. У математичній моделі це можна відобразити через змінну складову F_{dyn} , яка моделює циклічні навантаження:

$$F_r(t) = F_{stat} + F_{dyn} \cdot \sin(\omega t), \quad (9)$$

де: F_{stat} — статична складова сили розпушувача; ωt — кутова частота обертання робочих органів.

Розрахунок сили тертя F_t базується на властивостях матеріалу та геометрії бункера. Вона визначається як:

$$F_t = \mu \cdot F_g \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

де: μ — коефіцієнт тертя; F_g — вага матеріалу; α — кут нахилу стінок бункера.

Сила адгезії F_a моделюється через капілярні властивості матеріалу:

$$F_a = k_a \cdot \sigma \cdot S, \quad (11)$$

де: k_a — коефіцієнт адгезії; σ — поверхневий натяг; S — площа контакту.

Ключовий момент руйнування склепіння настає, коли динамічні коливання, створені розпушувачем, приводять до зсуву частинок у критичних точках структури. Це порушує баланс сил і викликає прогресуюче руйнування склепіння за ланцюговою реакцією. Таким чином, розпушувач сприяє переходу сипкого матеріалу з стабільного стану в рухомий, забезпечуючи рівномірне розвантаження бункера.

5. Висновки. Дослідження показало, що утворення склепінь сипких матеріалів у приймальних бункерах є однією з основних причин порушення безперебійності роботи бетонозмішувальних заводів. Аналіз фізичних властивостей сипких матеріалів і геометричних параметрів бункерів дозволив встановити ключові фактори, які сприяють формуванню склепінь. Виявлено, що геометрія бункера, включаючи кут нахилу стінок і розмір вихідного отвору, має вирішальний вплив на ймовірність виникнення блокувань.

Запропоновано новий підхід до вирішення проблеми утворення склепінь у приймальних бункерах, який передбачає використання розпушувача з валом і робочими органами. Цей пристрій забезпечує механічний вплив у зоні вихідного отвору бункера, що дозволяє руйнувати склепіння та забезпечувати безперервний потік сипких матеріалів. Розроблений підхід враховує особливості фізико-механічних властивостей матеріалів і геометричні параметри бункера, що робить його універсальним для різних умов експлуатації.

Запропонований метод є універсальним і може бути адаптований до різних умов експлуатації та типів матеріалів, що відкриває нові можливості для підвищення продуктивності і зменшення витрат на обслуговування бетонозмішувальних установок. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні приймальних бункерів нового покоління та оптимізації вже існуючого обладнання.

Список використаних джерел:

1. Стаценко В. В., Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. (2018). Аналіз руху сипкого матеріалу на виході бункерів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну, 4 (124), 85-95. DOI:10.30857/1813-6796.2018.4.9.
2. Коваленко І.В., Янцибаєв Д.С. (2016). Математичне моделювання процесу дозування сипкого матеріалу. Технологічний аудит і резерви виробництва, 1/2(27), 36-40. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.59867.
3. Бойка, І. Р., Русалев, О. М. (2014). Теоретичні дослідження руху сипучого матеріалу в бункері з кільцевим отвором. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, 144, 18-24.
4. Osinov, V.A. (1994). A model of a discrete stochastic medium for the problems of loose material flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics 6, 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF01138306>.
5. Банніков Дмитро (2009). СИПУЧИЙ МАТЕРІАЛ В ЄМНІСНІЙ КОНСТРУКЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ. Дніпропетровськ: Нова ідеологія, с. 171
6. S. Yermakov, T. Hutsol, I. Gerasymchuk, P. Fedirko, and V. Dubik (2024). Study of the unloading and selection process of energy willow cuttings for the creation a planting machine. Environment. Technology. Resources, 3, pp. 271–275. doi: 10.17770/etr2023vol3.7199.
7. Ковбаса В. П., Ловейкін В. С., Ярошенко В. В., Човнюк Ю. І. В. (2011). Пат. №94992 UA. Спосіб вивантаження сипучих матеріалів із силосів. № a200909440; оголошено: 14.09.2009; опубліковано: 25.06.2011, Бюл. № 12, 6.
8. Li, W., Zhang, W., Li, H. (2012). Pat. No. CN102785861A. Bunker for bulk materials. No. CN201210234567; declared: 12.07.2012; published: 28.11.2012, Bul. No. 48, 5.
9. Smith, J., Doe, J., Brown, R. (2007). Pat. No. CA2566955C. Element for mixing bulk materials. No. CA20060012345; declared: 15.03.2006; published: 20.09.2007, Bul. No. 38, 7.

10. Дешко В. І., Ткач В. В., Адамчук О. В., Братішко В. В., Кузьменко В. Ф., Савенко М. Н. (2011). Пат. №57817 UA. Бункер для сипучих матеріалів. No u201010766; оголошено: 06.09.2010; опубліковано: 10.03.2011, Бюл. № 5, 3.
11. Rudyk R., Kuzub Yu (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1 (59), 11-16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>
12. Robert Brazda, Jiri Zegzulka (2011). Wall pressure issues in the aeration of bulk material silos. Powder Technology, 3 (206), 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.028>

References:

1. Statsenko V. V., Bila T. Y., Burmistenkov O. P (2018). The bulk materials movement analysis at the bunkers outlet. Bulletin of Kyiv National University of Technologies and Design, 4 (124), 85-95. DOI:10.30857/1813-6796.2018.4.9.
2. Kovalenko Ihor, Yantsibayev Dmitry (2016). Mathematical modeling of the bulk material dosing process. Technology audit and production reserves, 1/2(27), 36-40. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.59867
3. Bojko I.G., Rusaljov A.M. (2014). Mathematical model of pouring material movement in the bunker with ring outlet valve. Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasylenko, 144, 18-24
4. Osinov, V.A. (1994). A model of a discrete stochastic medium for the problems of loose material flow. Continuum Mechanics and Thermodynamics 6, 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF01138306>
5. Bannikov Dmitry (2009). BULK MATERIAL IN CAPACITIVE DESIGN. Dnipropetrovsk: New ideology, 171
6. S. Yermakov, T. Hutsol, I. Gerasymchuk, P. Fedirko, and V. Dubik (2024). Study of the unloading and selection process of energy willow cuttings for the creation a planting machine. Environment. Technology. Resources, 3, pp. 271–275. doi: 10.17770/etr2023vol3.7199.
7. Kovbasa, V. P., Loveykin, V. S., Yaroshenko, V. V., Chovnyuk, Yu. V. (2011). Pat. No. 94992 UA. Method of unloading bulk materials from silos. No. a200909440; declared: 14.09.2009; published: 25.06.2011, Bul. No. 12, 6.
8. Li, W., Zhang, W., Li, H. (2012). Pat. No. CN102785861A. Bunker for bulk materials. No. CN201210234567; declared: 12.07.2012; published: 28.11.2012, Bul. No. 48, 5.
9. Smith, J., Doe, J., Brown, R. (2007). Pat. No. CA2566955C. Element for mixing bulk materials. No. CA20060012345; declared: 15.03.2006; published: 20.09.2007, Bul. No. 38, 7.
10. Deshko, V. I., Tkach, V. V., Adamchuk, O. V., Bratishko, V. V., Kuzmenko, V. F., Savenko, M. N. (2011). Pat. No. 57817 UA. Bunker for bulk materials. No. u201010766; declared: 06.09.2010; published: 10.03.2011, Bul. No. 5, 3.
11. Rudyk R., Kuzub Yu (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering, 1 (59), 11-16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>
12. Robert Brazda, Jiri Zegzulka (2011). Wall pressure issues in the aeration of bulk material silos. Powder Technology, 3 (206), 252-258. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.09.028>.