УДК 631.354.025

В.С. Ловейкін, проф., д-р. техн. наук, Л.С. Шимко, асп.
Національний університет біоресурсів і природокористування України
В.В. Ярошенко, інж.
„Тегра Україна ЛТД"

Огляд досліджень витоку сипких матеріалів

Визначено, що необхідна методика обґрунтування параметрів і режимів роботи вивантажувальних пристроїв комбайнів з урахуванням механіко-технологічних властивостей сільськогосподарських матеріалів, законів руху сипких тіл та особливостей технологічних процесів і операцій, пов'язаних із накопиченням і перевантаженням зерно-рослинного матеріалу із самоскидного бункера.
механіка, сипке тіло, гравітаційний виток, зерновий матеріал, самоскидний бункер

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок з важливим науково-практичним завданням. Високопродуктивна та якісна робота збиральних машин і комбайнів значною мірою залежить від швидкості вивантаження збираного продукту та параметрів і режимів роботи вивантажувальних пристроїв[1-2]. Зважаючи на це, значна частина науковців і винахідників обрала метою своїх досліджень та винаходів вирішення проблеми забезпечення стабільності процесу вивантаження зібраного матеріалу з бункера-накопичувача. Досягнення позитивних результатів їх наукового

© В.С. Ловейкін, Л.С. Шимко, В.В. Ярошенко, 2010

пошуку було б не можливе без глибокого дослідження закономірностей поведінки сипких матеріалів. В Національного університеті біоресурсів і природокористування України у відповідності до тематики наукових досліджень: «Оптимізація режимів руху механізмів ПТМ, що використовуються при механізації виробничих процесів у тваринництві і рослинництві на 2005-2010 рр.» державна реєстрація 0105U007502 досліджуються умови вивантаження зерна з самоскидного зернового бункера.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багатьма вченими досліджувались закономірності та сформовані закони механіки сипких матеріалів. Поглибленням їх наукового спадку стали роботи Л.В. Гячева, В.А. Богомягкіх, Р.А. Бегнолда, Д.Т. Дженкінса, С.Б. Севиджа, В.М. Долгуніна, В.Я. Борщьова та ін. [3-10]. Їх вклад у формування наукових засад теорії розрахунку спонукав до появи різноманітних конструкцій вивантажувальних механізмів.

Невирішена раніше частина загальної проблеми. Існуючі недоліки — значне пошкодження зібраного продукту; утворення статично стійких налипань; підвищення швидкості вивантаження матеріалу з різними фізико-механічними властивостями та ін. — залишаються невирішеною частиною загальної проблеми подальшого підвищення продуктивності збиральних машин і комбайнів.

Формулювання цілей статті. В зв'язку із зазначеним вище, необхідно вивчити, проаналізувати та узагальнити методи наукових досліджень робочих процесів витоку сипких матеріалів, що уможливить подальше наукове обґрунтування параметрів і режимів роботи вивантажувальних пристроїв збиральних машин та сприятиме підвищенню ефективності збирання сільськогосподарських культур.

Виклад основного матеріалу. Систематизація проаналізованого матеріалу вказує на те, що з розвитком науки відбуваються процеси виокремлення з теорії класичної механіки сипкого середовища багатьох напрямів досліджень пов'язаних в

основному з прикладним застосуванням наукових положень класичної теорії до тих чи інших сфер практичної діяльності (рис. 1).

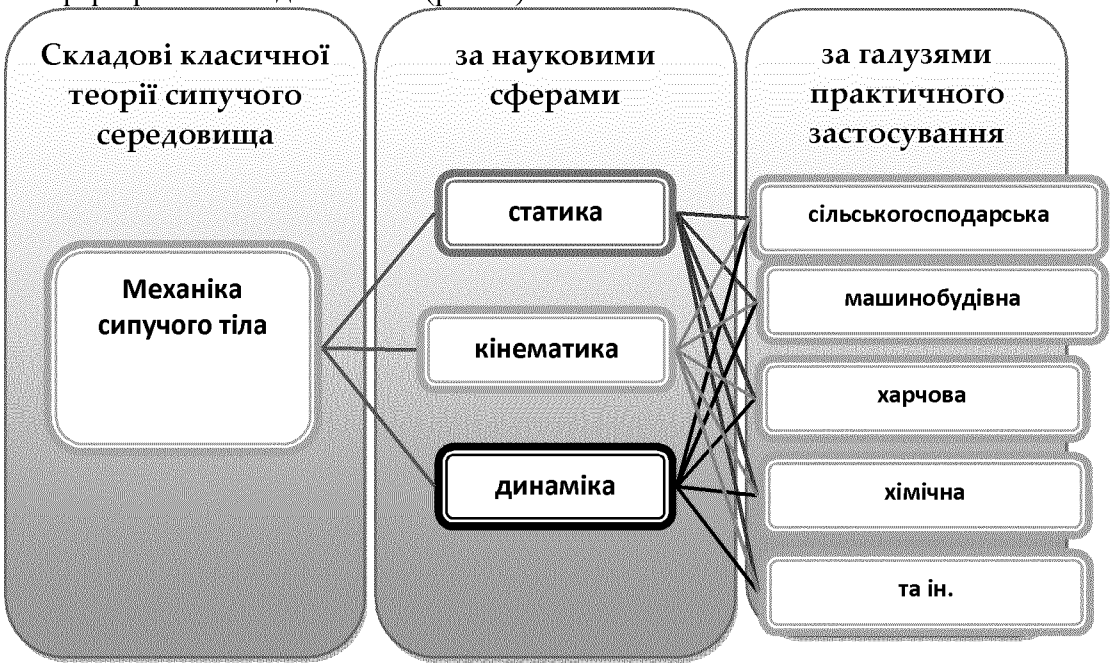

Рисунок 1 - Схема виокремлення напрямів наукових досліджень робочих процесів витоку сипких матеріалів

Відповідно до встановленої мети, у даній статті, методів наукових досліджень робочих процесів витоку сипких матеріалів, зроблений наголос на дослідження пов'язані з процесами природного, гравітаційного витоку сипких, зернистих матеріалів. Разом із тим, не можна обминути і шляхів розвитку класичної теорії.

Становлення науки, що вивчає сипучі тіла відбувалось разом із розвитком будівельної механіки. У витоку розуміння цих процесів стоять такі постаті як Леонардо да Вінчі, Галілео Галілей. Визнаним засновником класичної теорії сипкого середовища вважають Шарля Огюстена Кулона [10]. Видатний вчений, крім загальновідомих законів тертя, сформулював основні положення граничної рівноваги сипкого тіла та застосував їх до визначення тиску засипки.

Помітним вкладом у розвиток класичної теорії механіки сипких матеріалів, в тому числі сільськогосподарського призначення, є робота Х.Янсена [11], що з'явилася 1895р. і яка не втратила свого значення до теперішнього часу. Вченим виведена формула статичного тиску сипкого тіла на дно і стінки призматичного або циліндричного бункера. Експериментальні дослідження та досвід застосування формули показали, що фактичні напруження значно більші за розрахункові. Відхилення пов'язані із тим, що формула описує відношення між головними напруженнями сипкого тіла в стані граничної рівноваги та не враховує зростаючого ущільнення сипкого тіла за глибиною.

Подальшою розробкою теорії Янсена займалися багато дослідників. Так, Е.М.Гутьяр [12] врахував стисливість сипких тіл і отримав більш загальну формулу для визначення тиску в порівнянні з формулою Янсена.

Г.К.Клейн [10], розглядаючи тиск сипких матеріалів на стінки сховища, запропонував теоретичний спосіб розрахунку тиску на стінки з врахуванням збільшення щільності сипкого матеріалу із зростанням тиску. Вчений рекомендує збільшувати в два рази розрахункові навантаження на стінки посудин обраховані за формулою Х.Янсена.

На теренах колишнього СРСР одним із фундаторів статики сипкого середовища є чл.-кор. АН СРСР В.В.Соколовський (1912-1978р.). Ним розвинута теорія граничної

рівноваги сипкого середовища [13]. Сформульовані основні задачі теорії. Досліджені задачі про граничну рівновагу ідеально-сипкого клину, насипів та ін.

Помітною працею серед робіт присвячених вивченню закономірностей сипкого середовища є монографія Р.Л.Зєнкова [14], в якій чітко систематизуються та узагальнюються положення механіки сипких матеріалів, пропонується класифікація сипких матеріалів, викладені методи вимірювання їх параметрів, уточнюються поняття і визначення.

В розвиток дослідження розподілу тиску в сипкому матеріалі Р.Л.Зєнкова, у 1968 р. вийшла монографія Л.В.Гячева [4]. Вчений вивів диференціальні рівняння руху елементарного і кінцевого об'ємів сипкого матеріалу в бункерах різної форми. Вирішення цих рівнянь дозволило встановити розподіл тиску на дні і стінках бункерів при русі і спокої сипких матеріалів. Знайдені теоретичні залежності досить добре збігаються з експериментальними даними для сухих зернових культур, мінеральних добрив та ін. Адекватність моделі Л.В.Гячева обумовлена, зокрема, тим, що в неї включена низка параметрів, що характеризують сипкий матеріал: зовнішній і внутрішній кути тертя, кут укладання зерен, розмір зерен тощо. Це дозволило вивчити вплив кожного параметра сипкого матеріалу окремо на закони розподілу тиску. Запропонована вченим модель дозволяє досліджувати також і деякі граничні випадки. Так, при нескінченно малих розмірах зерен модель сипкого тіла за Гячевим перетворюється на «рідину», що володіє Кулоновим тертям між зернами. При рівності нулю кутів зовнішнього і внутрішнього тертя ця «рідина» перетворюється на так звану «ідеальну» рідину. Потрібно відзначити, що властивості такої рідини відмінні від властивостей звичайної ідеальної рідини.

Разом із тим, Л.В.Гячевим було прийнято ряд припущень та обмежень, що обумовлюють використання моделі тільки до вільних від гетерогенних домішок, сухих сипких матеріалів з однаковими розмірами зерен. Крім того, вченим, в розроблених теоретичних принципах не враховані властивості сипкого матеріалу щодо стиснення. Модель сипкого середовища Л.В.Гячева вимагала додаткового узагальнення у напрямі наближення її до властивостей реальних сипких матеріалів. Для вологого сипкого середовища, сили тертя між частинками сипкого середовища, а також між частинками і стінками бункера можуть бути визначені з врахуванням залежності сили тертя від швидкості.

У монографії В.А.Богомягких [11] на основі теорії утворення зводів (склепінь) пояснюється суть пульсації при витіканні зерна в бункері, встановлює зв'язок між пульсаціями і змінами тиску зерна на стінки бункера.

Зазначені вище теоретичні та експериментальні дослідження сил і тиску сипких матеріалів на дно і стінки бункерів в подальшому досліджувались і розвивались вченими в самих різних галузях їх практичного застосування. Хоча згадані теоретичні викладки не охоплюють багатьох питань пов'язаних із специфікою певної галузі вони мають важливе загально-практичне значення.

Розглянемо далі дослідження пов'язані з процесами природного, гравітаційного витоку сипких, зернистих матеріалів.

Сформовано на основі багатьох досліджень відгалужений науковий напрям отримав назву - «Теорія швидких рухів гранульованих середовищ» [13]. Зазначений напрям дещо вирізняється від класичної механіки сипкого середовища.

Г.О.Генієв, на основі теорії граничної рівноваги В.В.Соколовського, склав диференціальні рівняння руху сипкого матеріалу з бункера приймаючи, що напрям максимальних швидкостей зрушення збігається з напрямом активного сімейства ліній ковзання [14]. Узагальнюючи рішення задачі на випадок стисненого сипкого середовища, дослідник вважає, що щільність сипкого матеріалу є функцією напруженого стану. Автор припускає, що і коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього

тертя залежать від тиску в сипкому матеріалі. Практичне використання зазначеного методу розрахунків ускладнене тим, що залежність коефіцієнта внутрішнього тертя і об'ємної маси від напруженого стану сипкого середовища необхідно експериментально визначати. Якщо в різних частинах бункера часточки мають неоднакові коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя, то повинна спостерігатися залежність витрати сипкого матеріалу від висоти шару.

О.Ю. Ішлінський в рішенні задачі плоского руху сипкого тіла на відміну від Г.О. Генієва виводив замикаюче рівняння з умов збігу максимальних деформацій зрушення з напрямами максимальних дотичних напружень. Робота С.С. Грігоряна присвячена дослідженням механіки ґрунтів є розвитком досліджень О.Ю. Ішлінського. Використовуючи роботу В.Г. Бєрєзанцева [16], С.С. Грігорян знаходить аналітичні рішення для вісі-симетричних і центральносиметричних рухів ідеально сипкого середовища.

Значний теоретичний інтерес представляють дослідження І.В. Ширко. В роботі [17] проведений феноменологічний аналіз швидкої течії гранульованого середовища з використанням елементів теорії броунівського руху часток в припущенні, що сили, діючі на кожну часточку, можуть бути розділені на детерміновані і випадкові. На основі отриманих характеристик коливань часточок І. В. Ширко визначає величини потоків енергії та імпульсу в середовищі.

Скарлетт і Тодд у роботі [18] дослідили поведінку піску під дією прикладеного напруження зсуву. Експерименти проведені в кільцевому вічку нової конструкції. Представлені результат вимірів критичної пористості і розпушування піску, а також зсувного напруження в ньому. Для опису шару частинок запропоновано використовувати метод розподілу випадкових хорд. Виведено співвідношення між цим параметром і критичною пористістю. Проведено порівняння теоретичних і експериментальних результатів.

При розгляді переміщення сипкого тіла по нахиленому жолобу Р.Л. Зєнков [15] отримав спрощену формулу для визначення швидкості гравітаційного руху сипкого матеріалу у такому вигляді:

$$V = \sqrt{2gl\left[\sin\beta - f_1\cos\beta\left(1+\frac{nh}{b}\right)\right] + v_0^2}, \qquad (1)$$

де V – швидкість витікання сипкого матеріалу;

v_0 – початкова швидкість надходження на жолоб сипкого тіла;

β – кут нахилу жолоба;

l – довжина жолоба;

$\left(1+\frac{nh}{b}\right)$ – множник, що враховує опір бічних стінок жолоба, рекомендована величина — 1,2…1,375. При виведенні зазначеної формули Р.Л.Зєнков нехтує силами внутрішнього і зовнішнього тертя, масою елементу сипкого матеріалу.

При аналізі навантажень, що діють на бункер, Дженике А.В. і Іогансон І.Р. [19] пропонують розглядати три режими навантаження: початкове навантаження, коли матеріал засипається в бункер при закритому випускному отворі; навантаження при сталому витоку матеріалу із бункера; навантаження перемикання при переході від початкового навантаження до навантаження в умовах сталої течії. Вчені встановили, що останній стан навантаження має перехідний характер, разом із тим, цей стан супроводжується дією порівняно значних зосереджених сил. Підкреслюється значення бачення картини витоку, приведений вираз зосередженої сили, що як правило, виникає на ділянці переходу від вертикальної частини бункера до частини, що сходиться.

Одним з перших дослідників, який описав механізм формування напружень в зсувному потоці сипкого тіла був Бегнолд [6]. Вчений доводив, що основним

механізмом формування напруження на поверхні зсуву є перенесення кількості руху через поверхню в результаті послідовних ковзаючих зіткнень зернин одного шару, що наздоганяють зернини суміжного шару. Дотичні та нормальні напруження в швидких зсувних потоках по Бегнолду міняються пропорційно квадрату швидкості зрушення. Він встановив, що значення напруження відчутно зростають із збільшенням концентрації твердої фази.

Для розрахунку зсувного напруження усередині шару Бегнолд запропонував наступну формулу

$$\tau = P_y f \Delta Q_x, \tag{2}$$

де P_y – число часток, що приведено на одиницю площі поверхні, нормаль до якої має напрям y;

f – частота зіткнень часток, що взаємодіють через поверхню зрушення;

ΔQ_x – зміна тангенціальної складової кількості руху за одне зіткнення.

Використанням теорії граничної рівноваги при вирішенні задач витоку сипких матеріалів займались Мруз і Дрешер [20]. Вчені дослідили, що залежно від напруженого стану сипкого середовища, що ними розглядається як пружно-пластичний матеріал, останнє може виявляти властивості зміцнення, ослаблення або поводитися як ідеальне пластичне тіло. Мруз і Дрешер доводять, що під час безперервного витоку сипкого середовища поле напруження задовольняє умові, яку можна ототожнити з умовою текучості Кулона. Вводиться модель матеріалу Кулона, такий матеріал задовольняє умові текучості Кулона і закону витоку, пов'язаному з цією умовою за принципами пластичності потенціалу. Матеріал Кулона характеризується як міцніший, ніж реальний сипкий матеріал в стані граничної рівноваги. Для визначення нижніх меж тиску матеріалу, що витікає на стінки бункера, і для встановлення критерію, що характеризує здібність матеріалу до витікання, розглядається кінематично можливий механізм руйнування і використовується теорема про верхню межу. Досліджується, також, витік середовища, викликаний горизонтальним рухом шорсткої пластини. Проте в даній роботі не враховується форма зерен, їх розміри і умови, що характеризують тертя між зернами.

Такахаси [21] досліджував гравітаційний витік сухих пісків різної структури в прямих лотках прямокутного поперечного перерізу за різних кутах нахилу лотків. Вчений вирізнив два типи витоку сипкого тіла: перший полягає в тому, що верхній тонкий шар частинок тече над їх стаціонарним шаром, який покриває дно лотка, а другий — в тому, що всі частинки сипкого тіла рухаються, притому кожна з частинок хаотично відхиляється за випадковою траєкторією і помітно взаємодіє з сусідніми. Швидкість частинок, що залишали вихідний переріз каналу розраховувалася за їх траєкторією, вона показово зростала із збільшенням кута нахилу при першому режимі витоку сипкого тіла і набагато повільніше — при другому.

Робертс [22] вивчав витік насіння проса в плексигласових лотках з прямокутним поперечним перерізом. Застосувавши в своїх дослідженнях високошвидкісну кінозйомку, вчений визначив профілі швидкостей в різних точках вздовж потоку та виявив невеликий градієнт швидкості по глибині потоку. При швидкому витоку товщина потоку змінюється по довжині лотка; мінімальна товщина припадає на точки, в яких швидкість руху матеріалу максимальна. Використовуючи ефективний кут тертя між частинками і каналом та припускаючи, що сипке середовище нестискуване, він провів простий аналіз, який дав зміну усередненій по глибині швидкості і товщину течії залежно від відстані по потоку. Ефективний кут тертя вимірювався за квазістатичних умов і припускався незалежним від швидкості. Для прямолінійного похилого лотка з аналізу Робертса виходить, що потік прискорюється, сповільнюється або залишається рівномірним, коли ефективний кут тертя менший, більше або дорівнює куту нахилу

лотка відповідно. У своїх дослідженнях витоку ідеального сипкого зернистого матеріалу через розвантажувальні жолоби під дією власної ваги Робертс класифікує витік сипких матеріалів як «повільний» чи «швидкий». В роботі приведені результати дослідження умов, при яких здійснюється швидкий виток і дано наближений, метод розрахунку зміни товщини потоку. Цей метод, заснований на припущенні про сталу течію, включає вирішення нелінійних диференціальних рівнянь. Розглянуто співвідношення між результатами експериментальних досліджень, проведених в жолобах відомої геометричної форми, і теоретичними рішеннями. В роботі приведені розрахункові дані та рекомендації по конструюванню оптимальних жолобів. Вони включають пропозиції щодо раціональної форми жолоба, який задовольнятиме задані умови.

Севіджем і Сейдом [23]. були докладно досліджені властивості реологій сухих гранульованих матеріалів у кільцевому зсувному каналі. Вимірювання виконувались за різних об'ємних концентраціях твердих частинок і в широкому діапазоні швидкостей зсуву. Було знайдено, що при достатньо низьких об'ємних концентраціях твердих часток ($< 0,5$) і високих значеннях швидкості зсуву як нормальні, так і дотичні напруження зростали пропорційно квадрату швидкості зсуву, а коефіцієнт пропорційності лінійно залежав від щільності матеріалу гранул і квадрата їх діаметру. Севідж і Сейд вважають, що напруження були обумовлені виключно зіткненнями частинок. При вищих об'ємних концентраціях ($\geq 0,5$) і нижчих швидкостях зсуву напруження зростали пропорційно швидкості зсуву в степені < 2. На думку авторів, це пояснювалося виникненням між окремими групами частинок тривалих ковзаючих контактів, при яких мало місце сухе кулонівське тертя, тобто відбувався частковий перехід матеріалу в режим повільного витоку. У всіх експериментах також було виявлено різке зростання величини напруження із зростанням об'ємної концентрації частинок.

Аналіз результатів експериментів і обробка даних інших авторів дозволили Севіджу [23] зробити припущення про структуру напруження. Він передбачив, що вираз напруження в зсувному потоці гранульованого матеріалу складається з двох складових. Перша не залежить від швидкості і обумовлена кулонівським тертям між частинками, а друга складова залежить від швидкості та з'являється внаслідок обміну імпульсами між частинками сипкого середовища при їх зіткненнях. Таким чином, при повільному витоку (або при малих значеннях швидкості зсуву) суттєвішою є перша складова, а при зростанні швидкості зсуву головну роль починає відігравати друга.

Ісіда і Сараі [24] в певній частині повторили зазначені вище досліди Севіджа. Профілі швидкості вимірювалися за допомогою волоконно-оптичних зондів, розташованих на центральній лінії жолоба, а не на бічних стінках, як в експериментах Севіджа. Разом із тим вони вийшли такими ж, як і в експериментах Севіджа. Також спостерігалася точка перегину, відсутність ковзання по дну і «наповнення» профілю швидкості у міру зростання кута нахилу лотка При великих кутах нахилу ($\geq 30°$) профіль швидкості ставав практично лінійним.

Нажаль, в Україні досліджень, що стосуються вивчення процесів із сипкими матеріалами не так багато та відсутні дослідження пов'язані з вивченням закономірностей гравітаційного витоку зерно-рослинного матеріалу із самоскидних бункерів-накопичувачів збиральних комбайнів. Так, в роботі А.І.Пік [25] представлені теоретичні та експериментальні дослідження засобів механізованого перевантаження сипких сільськогосподарських матеріалів криволінійними трасами. На їх основі розроблені секційно-пружні лопатеві робочі органи гнучких гвинтових конвеєрів. Вирішено задачу розрахунку напружено-деформованого стану робочого органу, розроблено рекомендації щодо визначення зони обслуговування агрегатів гнучким гвинтовим конвеєром та інженерну методику проектування секційно-пружного

робочого органу і технологічної схеми процесу перевантаження сипких сільськогосподарських матеріалів криволінійними трасами.

Г.А.Молодченко [26] в своїх дослідженнях, запропонував фізичну модель процесу руху сипкого матеріалу усередині ємкості при розвантажуванні та формування його тиску на стінки силосів. Експериментально та теоретично обґрунтував граничні значення підвищення тиску сипкого матеріалу на стінки під час розвантаження. Автором запропоновано методики розрахунку несучої здатності стін, їх жорсткості з урахуванням виникнення тріщин по твірних.

Російські вчені В.М. Долгунін і В.Я. Борщьов свою монографію [9] присвятили узагальненню результатів досліджень закономірностей швидкого гравітаційного витоку зернистих матеріалів експериментальними, аналітичними і комбінованими методами. Ними запропонована нова техніка вимірювань і проведені експериментально-аналітичні дослідження структурно-кінематичних характеристик швидкого гравітаційного витоку зернистих матеріалів на шорсткій нахиленій поверхні. Вченими розроблений експериментально-аналітичний метод визначення характеристик витоку сипких матеріалів, що дозволяє одержувати комплексну інформацію про його закономірності. Метод спирається на аналіз фази вільного падіння зернин, що залишають поріг зсипання гравітаційного схилу та реалізується з використанням експериментальної установки.

Дослідження проводяться в режимах, близьких сталій гравітаційного витоку, що досягається шляхом встановлення поверхні нахилу під кутом, близьким куту природного зсуву часточок зернистого матеріалу.

В.М.Долгунін і В.Я.Борщьов [9] використовують для перевірки адекватності експериментально-аналітичного методу рентгенографічний метод визначення профілю порізності в гравітаційному потоці зернин.

Метод, що пропонується цими вченими, заснований на використанні проникаючого рентгенівського опромінення та фіксування його на рентгенівській плівці. Відмінною особливістю методу є те, що оцінка проникнення потоку зернистого середовища та його контрольних зразків, що мають певну концентрацію, виконується з використанням спільної рентгенограми. Завдячуючи цьому, суттєво підвищується точність рентгенівського аналізу, оскільки виключаються випадкові відхилення, що викликані різними властивостями плівки, умовами її проявлення та часу експозиції.

Як вже зазначалося в даному огляді, вивченням процесів витоку сипучих матеріалів саме сільськогосподарського призначення займаються дослідники відомої наукової школи Богомягких. Так, у роботі [5] розглядається зерновий матеріал на похилій площині та аналізується залежність сили внутрішнього тертя від тиску шарів сипкого середовища, що знаходяться вище. Причому пояснюються властивості гравітаційного витоку на основі теорії зводоутворення. Богомягкіх пояснює, що в різних точках зернового масиву аутогезійні і адгезійні сили мають різне значення. Неоднозначність цих сил приводить до того, що починається рух зернового матеріалу там, де найслабкіші сили зчеплення. Слабо зв'язані частинки починають переміщатися під дією тангенціальної сили тяжіння, і далі, під дією сил інерції приводять в рух інші зернини.

Висновки. Оглядовий пошук інформаційних джерел показав, що вивченням закономірностей механіки зсувного потоку сипкого тіла присвячено ряд теоретичних і експериментальних досліджень.

Наукові проблеми розглянуті в зазначених роботах є доволі складними і вирішуються за допомогою положень класичної механіки, теорії пластичності, механіки ґрунтів і реології із застосуванням математичного моделювання.

Відсутні дослідження присвячені вивченню закономірностей гравітаційного витоку зерно-рослинного матеріалу із самоскидного бункера-накопичувача збиральних

комбайнів та практичного застосування їх до удосконалення робочих циклів накопичення зібраного матеріалу та його розвантаженням у технологічні транспортні засоби.

Існуючі методи інженерних розрахунків збиральних комбайнів мало пристосовані до врахування технологічних і конструктивних параметрів самоскидних бункерів та кришки-лотка.

В зв'язку з чим, необхідна методика обґрунтування параметрів і режимів роботи вивантажувальних пристроїв комбайнів з урахуванням механіко-технологічних властивостей сільськогосподарських матеріалів, законів руху сипких тіл та особливостей технологічних процесів і операцій, пов'язаних із накопиченням і перевантаженням зерно-рослинного матеріалу із самоскидного бункера.

Список літератури

1. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки. / [Адамчук В.В., Баранов Г.Л., Барановський О.С. та ін.]; за ред. В.І. Кравчука, М.І Грицишина, С.М Коваля. – К.: Аграрна наука, 2004. – 396 с.
2. Войтюк Д.Г., Яцун С.С., Довжик М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посібник для студ. аграрних вищих закл. освіти III-IV рівнів акредитації зі спец. "Механізація сільського господарства" / Д.Г.Войтюк (ред.). — Суми : Університетська книга, 2008. — 543с.
3. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: Підручник /Царенко О.М., Войтюк Д.Г., Швайко В.М. та ін.; За ред. С.С. Яцуна. – К.: Мета, 2003. – 448 с.
4. Гячев Л.В. Основы теории бункеров / Л.В.Гячев. — Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 1992. — 312 с.
5. Механика влажных сводообразующих зерновых материалов в бункерах. / [Богомягких В.А., Кунаков В.С., Вороной Н.С. и др.]; под общей ред. В.А Богомягких – Зерноград.: РФРИАМА, 2000. – 100 с.
6. Bagnold R.A. Experiments on a gravity Free Dispersion of large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear // Proc. Roy. Soc. London, 1954. Vol. 225. P. 49 – 63.
7. Jenkins J.T., Cowin S.C. Theories for Flowing granular Materials // Mech. Fluid Engng. and Bioengng. Conf., AMD 1979. V. 51. P. 79 – 89.
8. Savage S.B., Cowin S.C. Theories for Flow Granular Materials // American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y., June 1999. P. 79 – 82.
9. Долгунин В.Н., Борщев В.Я. Быстрые гравитационные течения зернистых материалов: техника измерения, закономерности, технологическое применение.- М.: «Издательство Машиностроение-1», 2005.- 112 с.
10. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. Изд. 2-е, перераб. и доп. -М.: Стройиздат, 1977. - 256 с.
11. Jansen H. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen.-Berlin, 1985. – S 1045-1049.
12. Гутьяр Е.М. Вопросы динамики сыпучей среды // ЦНИИСК. – Научные сообщения. – М, 1958. – Вып.2. – С. 41-43.
13. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. / Соколовский В.В. – [4-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Наука, 1990. – 272 с.
14. Гениев Г.А. Динамика пластической и сыпучей сред. / Г.А. Гениев, М.И. Эстрин – М.: Издательство литературы по строительству, 1972. – 215 с.
15. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов.– М.: «Машиностроение» 1964. — 250 с.
16. Березанцев В.Г. Осесимметричная задача предельного равновесия сыпучей среды. - М., Гостехиздат, 1952.
17. Ширко И.В., Сахаров В.А. Феноменологическая теория быстрых движений гранулированной среды, основанная на методах статистической механики // Теоретические основы химической технологии. -1987.- Т. 21.- № 5,- С. 661 – 668.
18. Скарлет Б. Критическая пористость свободно истекающих сыпучих материалов / Б Скарлет, А.С. Тодд // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. – 1969. – Т. 9, Серия В. – №2. – С.198-210.
19. Дженике А.В. Гравитационное течение сыпучих масс, обладающих трением и сцеплением со стенками. Сведение напряженного состояния к радиальному полю напряжений // Прикладная механика. — 1965. — № 1. — С. 238-241.

20. Мруз З. Применение теории предельного равновесия в некоторых задачах течения сыпучих материалов / З. Мруз, А. Дрешер // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. – 1969. – Т. 9, Серия В. – №2. – С.72-80.
21. Takahasi K. The Gravity flow in nature // Geophys. Mag. 1937. Vol. 11. P. 165 – 175.
22. Робертс. Исследование истечения идеально сыпучего зернистого материала через разгрузочные желоба под действием собственного веса / Робертс // Труды американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. – 1969. – Т. 9, Серия В. – №2. – с 87-96.
23. Savage S.B., Sayed M. Experiments on dry cohesion less materials in annular cell at high stain rates.- Presented at EUROMECH 133-Statics and Dynamics of Granular Materials, 1980.-Oxford University.
24. Ishida M., Shirai T. Velocity Distributions in the Flow of Particles in an Inclined Open Channel // J. Chem. Eng. Jpn. 1979. Vol. 12. P. 45 – 50.
25. Підвищення технічного рівня засобів механізованого переміщення сипких сільськогосподарських матеріалів по криволінійних трасах: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.20.01 / А.І. Пік; Луц. держ. техн. ун-т. — Луцьк, 1999. — 19 с. — укр.
26. Залізобетонні силоси з раціональним формуванням технологічних впливів: Автореф. дис... д-ра техн. наук: 05.23.01 / Г.А. Молодченко; Харк. держ. акад. залізн. трансп. — Х., 2000. — 33 с. — укр.

В. Ловейкин, Л. Шимко, В. Ярошенко

Обзор исследований истока сыпучих материалов

Определенно, что необходима методика обоснования параметров и режимов работы выгрузочных устройств комбайнов с учетом механико-технологических свойств сельскохозяйственных материалов, законов движения сыпучих тел и особенностей технологических процессов и операций, связанных с накоплением и перегрузкой зерно-расстительного материала из самоскидного бункера.

V. Loveykin, L. Shymko, V. Yaroshenko

Review of researches of source of loose materials

Generalized and analysed methods and results of scientific researches of workings processes of effluence of loose materials.

Одержано 04.01.10