

## Исследование процесса гравитационного выгрузки черенков энергетической ивы в условиях статических и динамических сводообразований

С.В. Ермаков, Т.Д. Гуцол

*Подольский государственный аграрно-технический университет  
(м. Каменец-Подольский, Украина)  
email : ermkov@gmail.com*

Одним из перспективных источников возобновляемой энергии является энергия биомассы, которая владеет большим потенциалом для наращивания объемов культивированием таких культур как энергетическая ива. Посадка ивы осуществляется машинами, в которых посадочный материал подается вручную, что существенно ограничивает возможности повышения эффективности агрегатов. При создании автомата посадки такого материала возникла задача скоростной и точной подачи черенков, что привело к поиску путей обоснования движения черенков при выгрузке из накопительной емкости. В работе предлагается рассмотреть способ автоматизации посадки путем гравитационного выгрузки посадочного материала из щелевых бункеров. Из практики функционирования бункеров известно, что главным препятствием осуществления истечения кусковых материалов является явление сводообразования, которое, прерывая естественное истечение материалов, отрицательно влияет на их расходные характеристики. Исследование процесса выгрузки и формы образовавшихся сводов говорит о том, что в случае с таким материалом, как черенки энергетической ивы, кроме общих причин образования сводов и закономерностей формирования их формы возникают еще и другие. Особенностью черенков ивы есть их стержнеобразная форма, что усложняет сводообразование, и вызывает такие дополнительные условия и факторы как перекосы черенков в слое, неравномерность их заземления по длине и т.п. Исходя из полученных характеристик движения предлагается рассматривать массив черенков при их выгрузке как несжимаемую двухфазную псевдожидкость, в которой черенки являются дискретной компонентой, а воздух заполняющий пространство между ними выступает газообразной составной. При таких допущениях процесс выгрузки можно рассматривать с точки зрения многофазных систем и к движению черенков применять уравнение Навье-Стокса. Использование полученных данных в дальнейших исследованиях сделает возможным более полно учитывать все факторы, возникающие в процессе выгрузки и сводообразования, что важно при изучении и совершенствовании данного процесса.

**Ключевые слова:** черенок, автомат подачи, сводообразование, бункер, математическая модель, псевдожидкость, моделирование движения, энергетическая ива.

**1. Постановка проблемы и ее актуальность.** Множество машин, которые используются в технологических линиях, имеют дело с такими рабочими процессами, как загрузка, выгрузка, отбор, транспортировка и т.п. различных сыпучих материалов. Высокопроизводительная и качественная работа таких машин в значительной степени зависит от скорости выгрузки продукта, параметров и режимов работы разгрузочных устройств [1,2].

Многочисленные исследования процесса сводообразования позволили установить лишь некоторые зависимости, объясняющие суть этого процесса. Степень влияния огромного числа различных взаимосвязанных факторов на сводообразование трудно оценить практически и предсказать теоретически: это и геометрия бункера и выпускного отверстия, и физико-механические свойства

материалов, и условия загрузки, хранения и выпуска [3]. Именно в связи со сложностью обеспечения равномерного непрерывного движения, исключая процесс сводообразования, до настоящего времени не существует универсального питающего устройства, эффективно работающего с любым сыпучим материалом, а разнообразие материала, требующего выгрузки способствует дальнейшим поискам обоснований движения того или иного материала. Также трудно переоценить научное и практическое значение исследований механизма движения сыпучих материалов под действием собственного веса, так как физико-механические свойства данных материалов и закономерности их истечения оказывают решающее влияние на конструкцию бункеров, а также выпускных устройств и приспособлений, стимулирующих истечение.

Проблема еще больше усугубляется необходимостью обеспечения равномерного и непрерывного выгружения материала, у которого один размер (длина) значительно превышает два других размера. Примером такого материала являются черенки растений. Потребность изучения данного вопроса продиктована возрастающей популярностью топлив из биоэнергетических культур, для наращивания объемов которых требуются быстрые и производительные машины для создания так называемых энергетических плантаций. Одной из наиболее распространенных таких культур является энергетическая ива, посадка которой осуществляется вегетативным способом черенками длиной 20-25 см и диаметром 8-20мм [4-7].



Рис.1. Посадочный материал энергетической ивы

Посадка осуществляется машинами, в которых посадочный материал подается вручную, что существенно ограничивает возможности повышения эффективности агрегатов [8-14]. При создании автомата посадки такого материала возникла задача скоростной и точной подачи черенков, что привело нас к поиску путей обоснования движения черенков при выгрузке из накопительной емкости [15-19].

В целом задачи, связанные с погрузочно-разгрузочными операциями сыпучих и кусковых материалов, обеспечивающими сокращение ручного труда, увеличение производительности и коэффициента загрузки транспорта, требуют особого внимания. Ввиду этого, значительная часть ученых и изобретателей выбрала целью своих исследований и изобретений решение проблем обеспечения стабильности процесса выгрузки материала из бункера-накопителя. Достижения положительных результатов их научного поиска было бы невозможно без глубокого исследования закономерностей поведения сыпучих материалов. При использовании в технологическом процессе бункеров и транспортных средств с кузовами бункерной конструкции наблюдается явление сводообразования, в результате которого значительно увеличивается время полной очистки емкостей хранения и транспортировки насыпных грузов.

Это приводит к нарушениям требований безопасности при выполнении работ и достаточно большим финансовым потерям.

Очевидно, что актуальность решения данной проблемы связана не только с задачей повышения уровня технической и технологической надежности бункерных устройств, но и с обеспечением требований охраны и гигиены труда и с экономическим фактором.

**2. Анализ результатов последних исследований и публикаций, касающихся проблемы.** В области исследований динамики истечения сыпучих сред из емкостей, борьбы со сводообразованием и в сфере разработки сводообрушающего оборудования отметим значительный вклад следующих ученых К.В. Алферова, А.И. Белоусова, И.И. Блехмана, В.А. Богомягих, В.С. Горюшинского, И.В. Горюшинского, Л.В. Гячева, Э.В. Дженике, Д.Н. Ешуткина, В.И. Желткова, Р.Л. Зенкова, Р. Квапила, Б.Г. Кеглина, В.С. Кунакова, О.Г. Локтионовой, О.П. Мулжжина, В.Ф. Семенова, В.В. Соколовского, Г.М. Третьякова, Л.С. Ушакова, С.Ф. Яцуна и др. В их работах рассмотрены основные характеристики и физико-механические свойства сыпучих материалов, в той или иной степени влияющих на процесс сводообразования, отражены общие направления исследований в области бесперебойного функционирования бункерных устройств и совершенствования сводообрушающего оборудования для сыпучих грузов с широким спектром физико-механических свойств [20-34].

Следует подчеркнуть, что на сегодняшний день нет единой теории истечения сыпучих материалов и процессов сводообразования в бункере. Например, Р.Л. Зенков, Р. Квапил и др. отмечают значительное влияние на скорость истечения сыпучего материала высоты его слоя, а Б.С. Фиалков, Ф.Е. Кенеман и др. констатируют его отсутствие. Так, при хранении щепы в бункере происходит ее уплотнение, которое в процессе длительного хранения приводит к увеличению силы сцепления между частицами, что уменьшает их подвижность и способствует росту сил сопротивления сдвигу. Как показал опыт эксплуатации бункеров, формула Янсена дает заниженные значения давлений на днище и стенки бункера. Это объясняется тем, что в формуле не учитывается изменение плотности сырья при хранении в бункере. Теория Н. Янсена предусматривает случай, когда площадью давления является все дно бункера, а боковое трение возникает между разнородными телами – сыпучим телом и материалом стенок бункера [20]. В исследовании С. Дженки сыпучее тело представляет собой совокупность однородных абсолютно твердых плоских дисков, уложенных правильными рядами. В теории П. Шульца порода (груз)

рассматривается как изгибающаяся балка. Он указывает, что если совершенно однородные слои имеют малое сцепление, то каждый слой над выработанным пространством будет изгибаться сам по себе под влиянием собственного веса, как изгибается закрепленная по концам нагруженная балка. По теории профессора М. Протодьяконова нагрузка на свод принимается вертикальной и равномерно распределяется по всей его горизонтальной поверхности, в связи с чем кривая свода очерчивается по параболе [21]. Вопрос об образовании сводов в бункерах, когда размеры частиц сыпучего тела не слишком велики в сравнении с размерами возможных сводов, освещен в работах Н. Васильева, однако в его исследованиях не учтены факторы, влияющие на процесс сводообразования.

Вопросы силы сцепления между частицами подробно исследованы профессором Р.Л. Зенковым, который, исходя из их напряженного состояния, пришел к выводу, что при определенных условиях над выпускным отверстием образуется свод, совпадающий по форме с траекториями наибольших напряжений. Недостатком теории Р.Л. Зенкова является то, что в ней не учитывается влияние вышележащих слоев сыпучего материала на выделенный над выпускным отверстием элементарный объем, а также влияние размеров частиц [22,23].

В развитие исследования распределения давления в сыпучем материале Р.Л.Зенкова в 1968 г. вышла монография Л.В.Гячева [24,25]. Ученый вывел дифференциальные уравнения движения элементарного и конечного объемов сыпучего материала в бункерах различной формы. Решение этих уравнений позволило установить распределение давления на дне и стенках бункеров при движении и покое сыпучих материалов. Найденные теоретические зависимости достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными для сухих зерновых культур, минеральных удобрений и др. Адекватность модели Л.В.Гячева обусловлена, в частности, тем, что в нее включен ряд параметров, характеризующих сыпучий материал: внешний и внутренний углы трения, угол укладки зерен, размер зерен и тому подобное. Это позволило изучить влияние каждого параметра сыпучего материала отдельно на законы распределения давления. Предложенная ученым модель позволяет исследовать также и некоторые предельные случаи. Так, при бесконечно малых размерах зерен модель сыпучего тела за Гячевым превращается в «жидкость», владеющей Кулоновым трением между зернами. При равенстве нулю углов внешнего и внутреннего трения эта «жидкость» превращается в так называемую «идеальную» жидкость. Нужно отметить, что свойства такой жидкости отличные от свойств обычной идеальной жидкости

В монографии В.А. Богомяких [26,27] на основе теории образования сводов (сводов) объясняется суть пульсации при истечении зерна в бункере, устанавливает связь между пульсациями и изменениями давления зерна на стенки бункера.

В рамках теории профессора В.А. Богомяких объясняются все явления, возникающие в емкостях при статическом и динамическом состоянии сыпучих материалов на основании эквивалентного «динамического» свода. Анализ теоретического материала показывает, что наибольшим соответствием практическим исследованиям обладает сводообразующая модель сыпучего тела.

Как отмечает А. В. Варламов, теория В.А. Богомяких достаточно точно описывает процессы, протекающие в сыпучем теле при его выгрузке из бункеров, раскрывает теоретические предпосылки взаимосвязи параметров сыпучего тела с параметрами аккумулирующего его бункера, позволяет производить расчеты бункерных систем [28]. Согласно этой теории на движение сыпучего тела, ограниченного стенками бункера, оказывает значительное влияние динамическое и статическое сводообразование. Динамические своды замедляют процесс выгрузки, а статические его прекращают.

Анализируя работы А.И. Мансимова, Р.Л. Зенкова, А.В. Гячева, В.А. Богомяких, В.Ф. Семенова, К.В. Алферова, И.И. Кочанова, можно отметить, что основными параметрами, влияющими на величину расхода сыпучих материалов из бункеров, являются: размер выпускного отверстия бункера и физико-механические свойства сыпучих материалов. В ряде аналитических зависимостей присутствуют определенные коэффициенты и константы, значения которых обусловлены видом истекающего из бункера материала и соотношениями конструктивного плана применительно к машинам с большой часовой производительностью. В связи с чем применение этих зависимостей при обосновании бункера с питателем в решетной установке со значительно меньшей производительностью не является правомерным.

**3. Выделение ранее нерешенных частей общей проблемы.** Существующие недостатки питания сыпучих материалов — значительное повреждение собранного продукта; образование статически устойчивых налипаний; повышение скорости выгрузки материала с различными физико-механическими свойствами и др. - остаются нерешенной частью общей проблемы дальнейшего повышения производительности машин. Одним из главных препятствий для решения данной задачи является сложность процесса сводообразования. Изучив существующие теории, отражающие суть сводообразования, мы пришли к выводу, что подавляющая их часть описывает поведение самого материала, но не предлагает решения

выявленных проблем. Кроме того, поскольку свойства материалов значительно варьируются, очевидно, что единых подходов к решению проблем сводообразования нет.

Ученые выделяют два основных направления для обеспечения бесперебойной выгрузки сыпучих грузов из емкостей:

- предотвращение возникновения сводов, что может быть достигнуто правильным выбором параметров емкости;
- разрушение образовавшихся сводов с применением различных сводообрушающих устройств.

Оба направления актуальны, однако наиболее прогрессивно первое, так как лучше предотвратить сводообразование, чем бороться с ним. Моделирование движения частиц выгружаемого сыпучего материала, как и выбор средств для разрушения образовавшихся в емкости сводов зависит от физико-механических свойств материала и параметров самой емкости.

**4. Формирование цели работы.** В данной работе нас интересует поведение черенков энергетической ивы в процессе выгружения из бункера под действием гравитационных сил, поэтому целью статьи является поиск и выделение закономерностей движения стержнеобразных тел в процессе их истечения из бункеров. Для достижения данной цели следует решить такие задания:

- обосновать модель бункера для выгрузки черенков энергетической ивы;
- создать опытную модель бункера, удовлетворяющую условиям выгружения стержнеобразных материалов;
- проанализировать процесс сводообразования для стержнеобразных материалов и выявить характерные особенности образования сводов для черенков энергетической ивы;
- выявить возможность непрерывного истечения черенков энергетической ивы и характер протекания этого процесса;
- создать рекомендации касательно бункеров-питателей для сажалок энергетической ивы и определить направления для дальнейшего изучения данного процесса;
- теоретически получить формулу, оценивающую скорость истечения посадочного материала энергетической ивы.

**5. Изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов.**

**5.1 Модель бункера и двухфазная псевдожидкость моделирующая совокупность черенков.** Выгружение черенков энергетической ивы удобно совершать из бункеров с наклонными стенками и щелевым выгрузным

окном. В качестве модели бункера, для выгрузки черенков, будем рассматривать две полуплоскости, расположенные под углами  $\alpha$  и  $\beta$  к горизонтальной плоскости образующие выгрузную воронку с углом раствора  $\delta$ . Ширину выгрузного окна обозначим через  $b$ . Введём декартову систему координат  $x_1, x_2, x_3$  с осью  $x_3$  совпадающей с линией, проходящей через центр выгрузного окна. На рис.2 показано поперечное сечение бункера плоскостью  $x_1, x_2$ .

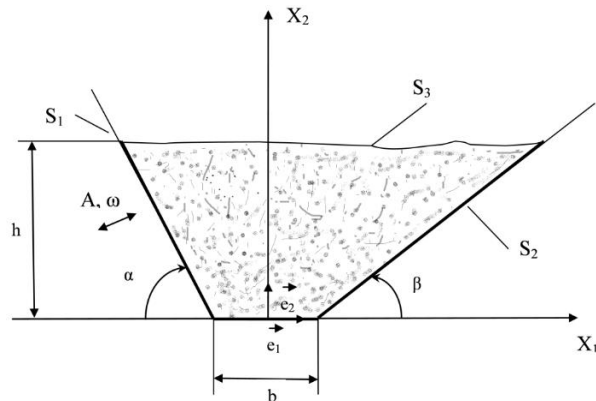


Рис. 2. Модель бункера для выгружения черенков энергетической ивы

В дальнейшем будем полагать, что движение черенков в бункере не зависит от координаты  $x_3$ , т.е. ограничимся рассмотрением двумерной модели процесса выгрузки черенков. Это ограничение предполагает наличие стенок, параллельных плоскости  $x_1, x_2$ , которые ограничивают движение черенков вдоль оси  $x_3$ . То есть, учитывая стержнеобразную форму черенков, примем характер заполнения ими бункера слоями один над другим, поэтому, исследуя движение в этом пространстве, можно ограничиться лишь вертикальной и горизонтальной составляющей в плоскости перпендикулярной черенкам и введенным полуплоскостям, пренебрегая возможностью их движения в поперечном направлении. Поэтому при изготовлении действующей опытной модели ограничим пространство бункера двумя параллельными стенками на расстоянии немного превышающим длину используемого для выгружения материала (рис.3).

Лабораторная установка позволяет в широких диапазонах регулировать углы двух полуплоскостей  $\alpha$  и  $\beta$ , а также изменять ширину выгрузного окна, что и требуется для исследования.

Использование данной модели бункера позволит исследовать характер истечения материала из бункера, а также определить краевые параметры для возможности такого истечения без сводообразований и, соответственно, без задержек.

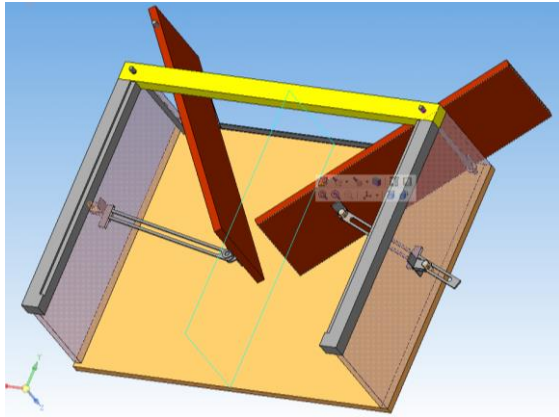


Рис. 3. Модель лабораторной установки

В процессе проведения опытов по изучению характеристик истечения стержнеобразного материала через щелевое выгрузное окно черенки энергетической ивы загружаются равномерным слоем в бункер при закрытом выгрузном окне. При установке малых параметров ширины окна неизбежно будут образовываться своды. Зафиксировав положение черенков при этом можно выделить факторы, влияющие на процесс сводообразования. А, расширив выгрузное окно, можно достичь условий, при которых истечение будет проходить безостановочно. Используя скоростную съемку при этом можно выявить закономерности такого истечения для использования при дальнейшем изучении данного процесса.

**5.2. Сводообразование при выгрузке черенков энергетической ивы.** Черенки растений имеют стержнеобразную форму, поэтому откидывая прочие факторы, сводообразование здесь можно рассматривать как процесс в одной плоскости, где выгружаемый материал образует арочную конструкцию. При этом черенки в своде (каждый из них) удерживаются от падения нормальными реакциями и соответствующими силами трения соседних черенков. А черенки, которые занимают крайние положения (соприкасающиеся с полуплоскостями) удерживаются нормальными реакциями и силами трения не только соседних черенков, а и силами их взаимодействия с материалом полуплоскости (рис.4.).

Для поиска возможных решений проблемы безостановочного истечения черенков энергетической ивы важно проанализировать возможные формы образующихся сводов. Принимая во внимание размерные характеристики черенков растений, не трудно спрогнозировать, что на процесс сводообразования может существенно влиять длина и диаметр черенков. На рис. 5 показано некоторые варианты зафиксированных сводов при выгрузке черенков через выгрузное отверстие при углах  $\alpha = 65^\circ$  и  $\beta = 40^\circ$ .

Таким образом, видим, что формы сводов существенно отличается от ожидаемых при идеальных условиях.

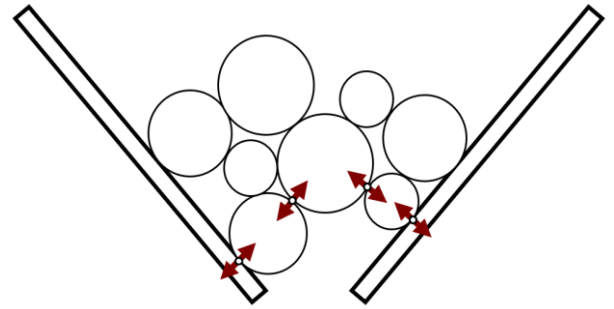


Рис. 4. Схема сводообразования при высыпании черенков

Отличие хотя бы в том, что не всегда крайние черенки в плоскости боковой стенки соприкасаются с полуплоскостью (поверхностью ската), а иногда и вовсе некоторые черенки в этой плоскости не контактируют с соседними черенками, переплетаясь с ними где-то в глубине слоя. Часто зависание черенков провоцирует неоднородное защемление его по длине, когда один из концов освобождается раньше другого и стремится занять вертикальное положение, что можно увидеть на рис. рис.5– б, в, е.

Отметим, что во многих случаях причиной таких отличий являются перекосы по длине черенков относительно друг друга. Также причиной иногда служили дефекты формы материала – искривление, зазубрины, излишняя конусность и т.п. При стечении многих этих причин в одном шаре, можно наблюдать даже картину как на рис.8, что делает процесс равномерной выгрузки затруднительным, а контролируемый выход материала в нужной ориентации практически невозможным.

Такие проблемы возникают в при малых величинах ширины выгрузного окна, когда преобладают статические своды над динамическими. Когда же ширину окна увеличить, процесс выгрузки совершается более равномерно и в этом случае можно наблюдать и анализировать закономерности истечения материала.

**5.3. Характер истечения черенков энергетической ивы при исключении статического сводообразования.** Статические своды останавливают процесс истечения, но вероятность его образования напрямую зависит от ширины выгрузного отверстия. В случае с выгрузкой черенков всегда можно найти такое значение ширины выгрузной щели, при котором таких остановок можно избежать [9]. Приняв опытным путем такую ширину, окна можно зафиксировать характер истечения материала из бункера в разные промежутки времени после начала выгрузки (открытия выгрузного окна). Так как процесс выгрузки от симметричных наклонных стенках происходит за одними и теми же принципами, посмотрим на фазы истечения при форме бункера с одной вертикальной стенкой (рис. 6).

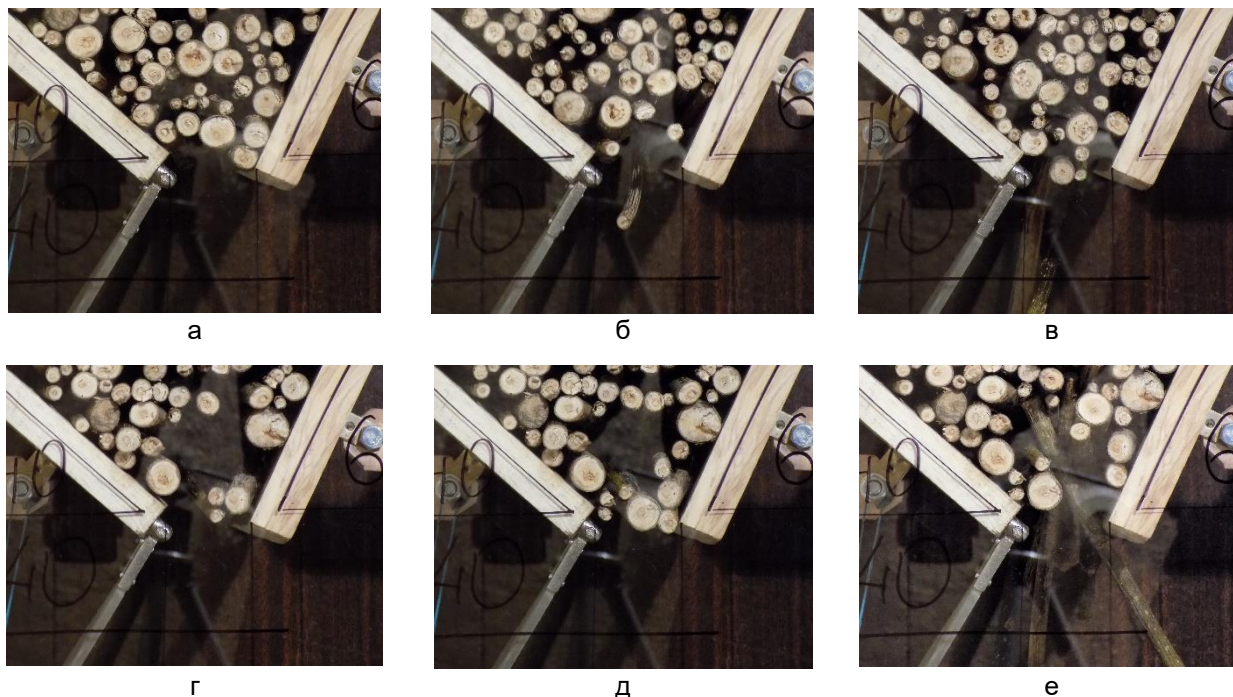


Рис.5. Примеры образованных сводов при выгрузке черенков энергетической ивы



Рис. 8. Проблемы выгрузки черенков энергетической ивы в зоне выгрузного окна

При выгрузке черенков из бункера с одной вертикальной стенкой сначала начинают двигаться черенки, которые находятся над выгрузочным окном вдоль вертикальной стенки (рис. 6 – 1 и 2). На наклонной стенке, расположенной под углом  $40^\circ$ , черенки образуют неподвижный слой. В результате высыпания части черенков над выгрузной щелью в верхних слоях образуется клиновидная лунка, которую отчетливо видно начиная уже со второй точки фиксации (рис. 6 – 2 и далее).

Через некоторое время в образовавшуюся пустоту обрушивается материал (рис. 6 – 4 и 5), который до того был неподвижным (верхние слои над наклонной стенкой). В результате образуются столкновения обрушивающихся слоев со

слоями нормального высыпания, которые еще не успели оставить отверстие (рис. 6 – 4). По нашему мнению, именно в этот момент возникает наибольшая вероятность образования статического свода и задержка (или даже остановка) выгрузки. Последним бункер оставляет слой черенков, который был в «ближнем окружении» к наклонной стенке (рис. 6 – 5). Продолжая опыты на разных углах установки полуплоскостей  $\alpha$  и  $\beta$ , можем констатировать приблизительно те же закономерности. Можно только добавить что при разных углах установки полуплоскостей, последними бункер покидают черенки, которые располагались на наклонной поверхности, имеющей меньший угол наклона к горизонту  $\alpha$  или  $\beta$  (рис.7)

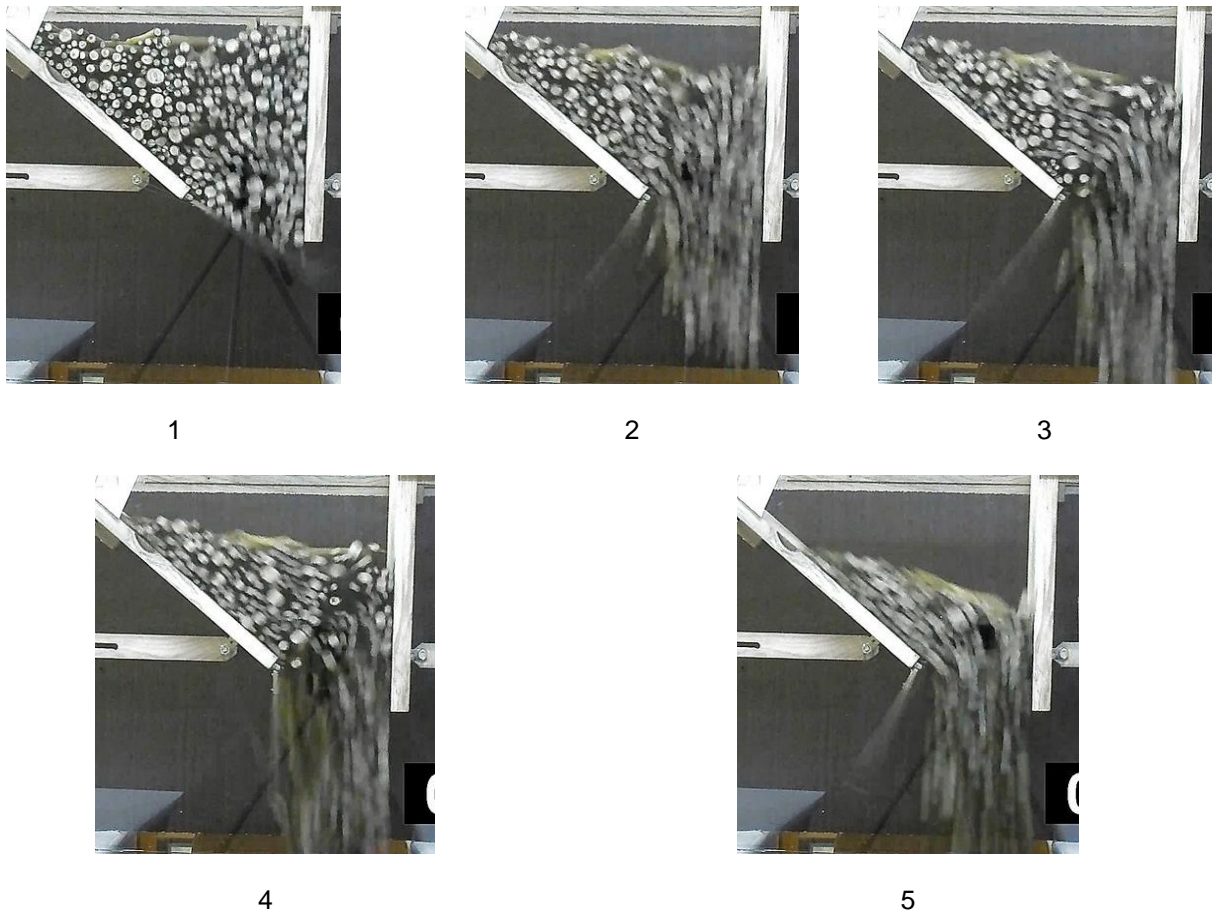


Рис. 6. Фазы истечения черенков энергетической ивы из бункеров при углах наклонных полуплоскостей  $\alpha = 90^\circ$  и  $\beta = 40^\circ$

Таким образом, можно констатировать, что при выгрузке черенки движутся в объеме бункера неравномерно: сначала движутся черенки над выгрузочным окном, а в конце – черенки над наиболее наклонной стенкой. Соответственно и скорость движения черенков над выгрузочным окном всегда самая большая, а скорость черенков над наклонной стенкой тем меньше, чем меньше угол ее наклона. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что процесс истечения черенков осуществляется за правилами нормального истечения материалов, при котором вначале выпадает столп над отверстием, а потом подвигаются слои со сторон.

**5.4. Уравнение движения двухфазной псевдожидкости.** Процесс выгрузки черенков из объема бункера может быть смоделирован на основе методов гидродинамики многофазных систем [36,37]. При таком подходе совокупность черенков, которая подвергается воздействию гравитационного поля и вибрационным колебаниям, моделируется двухфазной структурой. Эта структура состоит из дискретной компоненты (совокупность черенков) и непрерывной компоненты (газообразная среда – воздух). Эти компонента с точки зрения механизма многофазных систем рассматриваются, как сплошные среды.



Рис. 7. Окончание выгрузки черенков при углах установки наклонных стенок  $\alpha = 65^\circ$  и  $\beta = 40^\circ$

Эти среды характеризуются двумя эффективными коэффициентами вязкости, обусловленными как взаимодействием черенков между собой, так и взаимодействием черенков с газообразной средой (воздухом). Предполагается, что объемная концентрация черенков (дискретная компонента) значительно больше аналогичной величины для непрерывной компоненты. В этом случае вязкостью, связанной с взаимо-

действием черенков с газообразной средой, можно пренебречь.

Поэтому, движение дискретной компоненты можно моделировать как движение вязкой несжимаемой псевдожидкости. Поле скорости такой псевдожидкости должно удовлетворять уравнению Навье – Стокса.

Решение этого уравнения в линейном приближении и будет являться математической моделью процесса выгружения черенков из бункера.

При этом будем считать, что слой черенков условно состоит из круговых цилиндров, имеющих плотность  $\bar{\rho}$  длину  $b$  и радиус  $a$ .

Введём плотности этих сплошных сред. Пусть  $\bar{\rho}$  – усреднённая по всем черенкам плотность,  $\bar{\rho}$  – плотность газообразной среды (воздух). Тогда плотность дискретной фазы определяется по формуле [36]

$$\rho = \delta \bar{\rho}, \quad (1)$$

а плотность непрерывной фазы

$$\rho_1 = (1 - \delta) \bar{\rho}_1. \quad (2)$$

Здесь  $\delta$  – объёмная концентрация черенков в бункере. Кроме параметров  $\rho$  и  $\rho_1$ , псевдожидкость характеризуется эффективными динамическими коэффициентами вибровязкости:  $\mu$  – коэффициент вибровязкости дискретной фазы, обусловленный взаимодействием черенков между собой;  $\mu_1$  – коэффициент динамической вязкости газообразной среды (воздух).

Далее, будем предполагать, что объёмная концентрация черенков значительно больше аналогичной величины непрерывной фазы. В этом случае эффективным коэффициентом вибровязкости обусловленным взаимодействием черенков с газообразной средой можно пренебречь. Таким образом, движение совокупности черенков будем моделировать как движение двухфазной псевдожидкости.

Введём поля скоростей:  $\vec{V}$  – поле скоростей дискретной фазы и  $\vec{V}_1$  – поле скоростей непрерывной фазы. В соответствии с [36], уравнения движения двухфазной псевдожидкости можно представить в следующем виде

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}_1, \nabla) \vec{V} \right) = -\nabla P + \mu \Delta \vec{V} + \vec{F} - \rho g e_2, \quad (3)$$

$$\rho_1 \left( \frac{\partial \vec{V}_1}{\partial t} + (\vec{V}_1, \nabla) \vec{V}_1 \right) = - (1 - \delta) \nabla P_1 + \mu_1 \Delta \vec{V}_1 - \vec{F} - \rho_1 g e_2, \quad (4)$$

$$\text{div} \vec{V} = 0, \quad (5)$$

$$\text{div} \vec{V}_1 = 0, \quad (6)$$

Здесь  $e_1, e_2, e_3$  – орты декартовой системы координат,  $P_1, P_2$  – давления дискретной и непрерывной фаз,  $g$  – ускорение свободного падения,  $\vec{F}$  – сила действующая на единицу массы псевдожидкости и, согласно [36], имеющая вид

$$\begin{aligned} \vec{F} = & 0.5 \frac{\rho \rho_1}{\bar{\rho}} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}_1 - \vec{V}) + \right. \\ & \left. + (\vec{V}_1 - \vec{V}, \nabla) (\vec{V}_1 - \vec{V}) \right] + \\ & + 4.5 \frac{\rho \rho_1 \sqrt{v_1}}{\sqrt{\pi a \bar{\rho}}} \int_0^t \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\vec{V}_1 - \vec{V}) + \right. \\ & \left. + (\vec{V}_1 - \vec{V}, \nabla) (\vec{V}_1 - \vec{V}) \right] \times \\ & \times (t - \tau)^{-1/2} d\tau + \Phi (\vec{V}_1 - \vec{V}), \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\Phi = 37.5 \frac{\bar{\rho}_1 v_1 \delta \rho}{\bar{\rho} a^2 (1 - \delta)^2}, \quad (8)$$

$a$  – радиус круга по площади совпадающей со средней площадью поперечных сечений черенков,  $v_1$  – коэффициент кинематической вязкости непрерывной фазы.

Уравнения (3) – (6) являются нелинейными интегро-дифференциальными уравнениями. Построение решения этих уравнений в общем случае возможно только численными методами с помощью компьютера [38]. Кроме того, как следует из (3), при гидродинамическом моделировании движения черенков, следует вводить такую важную характеристику, как эффективный коэффициент вибровязкости  $\mu$ .

Определение этого коэффициента является важной и сложной задачей [39,40].

Поскольку её решение позволяет оценить адекватность математической модели реальным физическим процессам, которые сопровождают движение черенков в бункере. Ниже с помощью результатов [39,40], будет получена формула динамического коэффициента вибровязкости.

## 6. Выводы, вытекающие из проведенного исследования и дальнейшие перспективы

Для решения вопросов освобождения процесса посадки энергетической ивы от ручного труда при подаче посадочного материала от накопительных емкостей к месту посадки возникает необходимость создания автоматизированной системы подачи. Отбор и транспортировку черенков в такой системе можно организовать с помощью гравитационного выгружения из бункера.

Обзорный поиск информационных источников показал, что изучением закономерностей механики выгружения потока сыпучего тела посвящен ряд теоретических и экспериментальных исследований. Научные проблемы рассмотрены в указанных работах являются довольно сложными и решаются с помощью положений



классической механики, теории пластичности, механики грунтов и реологии с применением математического моделирования. К тому же большинство трудов посвящены исследованию мелкокусковых материалов, а процесс выгрузки материалов типа черенков растений является практически неизученным.

Анализ процесса выгрузки и формы образовавшихся сводов говорит о том, что в случае с таким материалом, как черенки энергетической ивы, кроме общих причин образования сводов и закономерностей формирования их формы возникают еще и другие. Особенностью черенков растение есть их стержнеобразная форма, что усложняет сводообразование, и вызывает такие дополнительные условия и факторы. как перекосы черенков в слое, неправильная форма черенков, неравномерность их заземления по длине и т.п.

При создании условий, при которых отсутствует возникновения статических сводов, стало возможно проанализировать закономерности выгрузки черенков из бункера. При этом истечение происходит за принципом нормального истечения.

Модель такого бункера состоит из двух полуплоскостей, расположенных под углом к горизонту, внизу которых образуется выгрузное окно с регулируемой шириной.

Для моделирования движения совокупности черенков была принята модель бункера в виде двух полуплоскостей, расположенные под углами  $\alpha$  и  $\beta$  к горизонтальной плоскости. Ширину выгруженного окна обозначим через  $b$ . При этом для возможности математической обработки процесса были использованы методы гидродинамических многофазных систем при котором совокупность черенков рассматривается как псевдожидкость, состоящая из двух фаз: дискретная фаза, образованная черенками, и непрерывная фаза – газообразная среда (воздух).

Для этой псевдожидкости представлены закономерности движения, которые являются нелинейными интегро-дифференциальными уравнениями, которые возможно обработать программными средствами.

Поля скорости двухфазной псевдожидкости, моделирующей совокупность черенков, должны удовлетворять начальным и краевым условиям, которые представлены в виде уравнений. Таким образом, созданы предпосылки для создания математической модели процесса выгрузки слоя черенков из бункера.

Математическое моделирование процесса выгрузки черенков энергетической ивы позволяет теоретически обосновать возможность повышения эффективности процесса посадки вплоть до его полной автоматизации. В результате исследований теоретически получена фор-

мула, оценивающая скорость истечения посадочного материала энергетической ивы, адекватность которой частично уже проверена в экспериментальных опытах, проведенных авторами работы на пути к созданию автомата посадки.

Использование полученных данных в дальнейших исследованиях сделает возможным более полно учитывать все факторы, возникающие в процессе выгрузки и сводообразования, что важно при изучении и совершенствовании данного процесса.

### Література:

1. Адамчук В.В., Баранов Г.Л., Барановский О.С. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки. Київ: Аграрна наука, 2004. – 396с.
2. Войтюк Д.Г., Яцун С.С., Довжик М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку — Суми : Університетська книга, 2008. – 543с.
3. Минько Р. Н. Проблема сводообразования в емкостях бункерного типа в условиях длительного хранения. Ярославский педагогический вестник, 3(1). 2013.
4. Frączek J., Mudryk K., Ślipek Z.: Wierzba salix viminalis alternatywą energetyczną dla gospodarstw rolnych w Małopolsce. Inżynieria Rolnicza. 3/58. 2004.
5. Ермаков С., Гуцол Т. Mudryk K. Використання верби в енергетичних і господарських цілях. Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації. Переяслав-Хмельницький 2018. – с.732-735.
6. Борис М.М., Ермаков С.В. Перспективи автоматизації садіння живців енергетичних культур. Збірник наукових праць Міжнародної наукової конференції присвяченої 117 річниці від дня народження академіка П.М.Василенка. Кам'янець-Подільський, 2017. – с.23-26.
7. Роїк М.В., Сінченко В.М., Фучило Я.Д. та ін. Енергетична верба: технологія вирощування та використання; під заг. ред. В.М. Сінченка. Вінниця : ТОВ «Нілан-ЛТД», 2015. – 340 с.
8. Hutsol T., Yermakov S., Firman Ju, Duganets V., Bodnar A. Analysis of technical solutions of planting machines, which can be used in planting energy willow Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. 2018. – pp.99-111. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_10)
9. Ермаков С.В. Перспективи удосконалення конструкцій для садіння живців енергетичних культур. Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Випуск 26. 2017. – С.37-45
10. Yermakov S., Hutsol T., Slobodian S., Komarnitskyi S., Tysh M. Possibility of using automation tools for planting of the energy willow cuttings. Renewable Energy Sources: Engineering,

Technology, Innovation. 2018. – pp.419-429.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_42)

11. Ермаков С., Борис Н. Сопоставление решений лесопосадочных машин с требованиями для энергетических древесных культур (ива, тополь). Научно-теоретический и практический журнал "Современный научный вестник". №20-1 (267). Белгород: Руснаучкнига, 2016. – с.67-68

12. Ермаков С., Tulej M., Tulej W., Шевчук I. Аналіз конструкцій автоматів садіння Матеріали ХХХІV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації»: Зб. наук. праць. Переяслав-Хмельницький, 2018. Вип. 34. – с.615-619

13. Ермаков С.В., Борис М.М. Аналіз ефективності агрегатів для садіння енергетичної верби. Materialy XI Mezinarodni vedecko-prakticka konference "Veda a vznik - 2015". Praha: Publishing House "Edukation and Science" s.r.o. 2015 – с.47-52

14. Ермаков С.В., Борис М.М., Борис А.М. Сучасний стан технічного забезпечення процесу садіння деревних енергетичних культур. Збірник наукових праць міжнародної науково-практичної конференції "Аграрна наука та освіта Поділля" Том. 2. - Тернопіль, Крок, 2017. – с. 37-40

15. Ivanyshyn V., Yermakov S., Ishchenko T., Mudryk K., Hutsol T. Calculation algorithm for the dynamic coefficient of vibro-viscosity and other properties of energy willow cuttings movement in terms of their unloading from the tanker. E3S Web of Conferences, 2020, 154. 04005 <https://10.1051/e3sconf/202015404005>

16. Yermakov S.V., Hutsol T.D. Features of the heterogeneous rood-like materials outflow (by example of energy willow cutting). Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research. 2018. – pp.55-68

17. Yermakov S., Hutsol T., Ovcharuk O., Kolosiuk I. Mathematic simulation of cutting unloading from the bunker. Independent journal of management & production v.10, n.7, Special Edition PDATU, 2019. – Pp.758-777. <https://doi.org/10.14807/IJMP.V10I7.909>

18. Yermakov S., Hutsol T., Mudryk K., Dziedzic K., Mykhailova L. The analysis of stochastic processes in unloading the energy willow cuttings from the hopper. Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources. Rezekne; Latvia; 2019. – pp.249-252. <https://doi.org/10.17770/etr2019vol3.4159>

19. Yermakov S. Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (*Salix Viminalis*). Teka. Quarterly journal of agri-food industry. V.2. 2019. – pp.71-78.

20. Jansen H. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. Berlin, 1985. – pp.1045-1049.

21. Protodyakonov M.M., Teder R.I., Ilnickaya E.I. Raspredelenie i korrelyaciya pokazatelej fizicheskix svojstv gornyx porod: spravochnoe posobie [Distri-

bution and correlation of indicators of the physical properties of rocks]. Moskow: Nedra.1981 – 192 p.

22. Зенков Р.Л. Бункерные устройства. Москва: Машиностроение, 1966. – 234 с.

23. Зенков Р.Л. Механика насыпных грузов. Москва: «Машиностроение» 1964. – 250 с

24. Gyachev L.V. Dvizhenie sypuchix materialov v trubax i bunkerax [The movement of bulk materials in pipes and bins] Moskow: Mashinostroenie, 1968. – 184 p.

25. Гячев Л.В. Основы теории бункеров. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета. 1992.

26. Богомягих В.А., Пепчук А. П. Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зернистых материалов. Зерноград. 1985.

27. Bogomyagkih V.A., Kunakov V.S., Voronov N.S. Mexanika vlazhnyx svodoobrazuyushhix zernovyx materialov v bunkerax [Mechanics of bridging wet grain materials in bins]. Zernograd: Rfriama, 2000. – 100 p.

28. Varlamov A.V. The background for designing the mathematical model of dynamic system "Hopper device with bulk material — bridging — the mechanism of fracture of bridging Bulletin of the Samara State University of Communications. № 2 (12). 2011 – p. 79–89.

29. Горюшинский И. В. Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах [Текст] : учебное пособие. Самара: СамГАПС, 2003. – 232 с.

30. 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.

31. Jenkins J.T., Cowin S.C. Theories for Flowing granular Materials // Mech. Fluid Engng. and Bioengng. Conf., AMD 1979. V. 51. – P. 79 – 89.

32. Savage S.B., Cowin S.C. Theories for Flow Granular Materials. American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y., June 1999. – P. 79 – 82.

33. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. / Соколовский В.В. Москва: Наука, 1990. – 272 с.

34. Гениев Г.А. Динамика пластической и сыпучей сред. Москва: Издательство литературы по строительству, 1972. – 215 с.

35. Dziedzic K., Łapczyńska-Kordon B., Mudryk K. (2017) Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix Viminalis* L.). Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation. Vol. 1, No. 1, pp.150-160

36. Соус С. Гидродинамика многофазных систем. Москва: Мир, 1971. – 536с.

37. Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. Москва: Наука, 1978. – 336с.

38. Крылов В.И. Вычислительные методы. т.2. Москва: Наука, 1976. – 399с.

39. Тищенко Л.Н. Интенификация сепарирования зерна. Харьков: Основа. 2004. – 224с.
40. Тищенко Л.Н. Виброрешётчатая сепарация зерновых смесей. Харьков Мисърук. 2011. – 280с.
41. Лаврентьев М.А. Методы теории функций комплексного переменного. Москва: Изд – во физико – математической лит., 1958. – 674с.
42. Боголюбов Н.Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Москва: Наука, 1974. – 504с.

#### References:

1. Adamchuk V.V., Baranov H.I., Baranovsky O.S. Suchasni tendentsii rozvytku konstruksii silskohospodarskoi tekhniki [Modern trends in the development of agricultural machinery designs] Kyiv: Ahrarna nauka. (2004)
2. Voitiuk D.H., Yatsun S.S., Dovzhyk M.IA. Silskohospodarski mashyny: osnovy teorii ta rozrakhunku [Agricultural Machinery: The Basics of Theory and Calculation] Sumy: Universytetska knyha. (2008)
3. Min'ko, R. N.: Problema svodoobrazovaniya v emkostyah bunkernogo tipa v usloviyah dlitel'nogo hraneniya. YAroslavskij pedagogicheskij vestnik, 3(1). (2013).
4. Frączek J., Mudryk K., Ślipek Z.: Wierzba salix viminalis alternatywą energetyczną dla gospodarstw rolnych w Małopolsce. Inżynieria Rolnicza. 3/58. (2004).
5. Yermakov S., Hutsol T. Mudryk K. Vykorystannia verby v enerhetychnykh i hospodarskykh tsiliakh. Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii. Pereiaslav-Khmelnyskyi 2018. (2018)
6. Borys M.M., Yermakov S.V. Perspektyvy avtomatyzatsii sadinnia zhyvtsiv enerhetychnykh kultur. Zbirnyk naukovykh prats Mizhnarodnoi naukovo konferentsii prysviachenoi 117 richnytsi vid dnia narodzhennia akademika P.M.Vasylenka. Kam'ianets-Podilskyi (2017)
7. Roik M. V., Sinchenko V. M., Fuchylo Ya. D., Pyrkin V. I., Ganzgenko O. M. Energetichna verba: tehnologiya vyroschuvannya ta vykorystannya [Energy willow, growing technology and usage]. V. M. Sinchenko (Ed.). Vinnycya: TOV "Nilan-LTD". (2015)
8. Hutsol T., Yermakov S., Firman Ju, Duganets V., Bodnar, A. Analysis of technical solutions of planting machines, which can be used in planting energy willow Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. (2018)
9. Yermakov S.V. Prospects for improvement of constructions for planting energy crops cuttings. Podilskyi visnyk: silske gospodarstvo, tekhnika, ekonomika. (2017)
10. Yermakov S., Hutsol T., Slobodian S., Komarnitskyi S., Tysh M. Possibility of using automation tools for planting of the energy willow cuttings. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. (2018). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-13888-2_42)
11. Yermakov S.V., Borys M.M. Sopostavleniye resheniy lesoposadochnih mashyn dlya energeticheskikh drevesnyh kultur [Comparison of decisions planting machines with requirements for energy tree crops (willow, poplar)]. Belgorod: Rusnauchkniga. (2016)
12. Yermakov S., Tulej M., Tulej W., Shevchuk I. Analiz konstruksiy avtomativ sadinnia [Construction analysis means of planting automation]. Materialy XXXIV Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii «Tendentsii ta perspektyvy rozvytku nauky i osvity v umovakh hlobalizatsii». Pereiaslav-Khmelnyskyi. (2018)
13. Yermakov S. V., Borys M. M. Analiz efektyvnosti agregativ dlya sadinnia energetychnoi verby [The analysis of efficiency aggregates for planting energy willow]. Praha : Publishing House "Edukation and Science" s.r.o. (2015)
14. Yermakov S.V., Borys M.M., Borys A.M. (2017) Suchasnyi stan tekhnichnoho zabezpechennia protsesu sadinnia derevnykh enerhetychnykh kultur. Zbirnyk naukovykh prats mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii "Ahrarna nauka ta osvita Podillia" Tom. 2. Ternopil, Krok. (2017)
15. Ivanyshyn V., Yermakov S., Ishchenko T., Mudryk K., Hutsol T. (2020) Calculation algorithm for the dynamic coefficient of vibro-viscosity and other properties of energy willow cuttings movement in terms of their unloading from the tanker. E3S Web of Conferences. (2020)
16. Yermakov S.V., Hutsol T.D. Features of the heterogeneous rood-like materials outflow (by example of energy willow cutting). Technological and methodological aspects of agri-food engineering in young scientist research. (2018)
17. Yermakov S., Hutsol T., Ovcharuk O., Kosiuk I. Mathematic simulation of cutting unloading from the bunker. Independent journal of management & production v.10, n.7, Special Edition PDATU. (2019)
18. Yermakov S., Hutsol T., Mudryk K., Dziedzic K., Mykhailova L. (The analysis of stochastic processes in unloading the energy willow cuttings from the hopper. Vide. Tehnologija. Resursi - Environment, Technology, Resources. Rezekne; Latvia. (2019)
19. Yermakov S. Application of the laplace transform to calculate the velocity of a two-phase fluid modulated by the movement of cuttings of an energy willow (Salix Viminalis). Teka. Quarterly journal of agri-food industry. (2019)
20. Jansen H. Versuche uber Getreidedruck in Silozellen. Berlin. (1985)
21. Protodyakonov M.M., Teder R.I., Ilnickaya E.I. Raspredelenie i korrelyaciya pokazatelej fizicheskix svojstv gornyx porod: spravochnoe posobie

[Distribution and correlation of indicators of the physical properties of rocks]. Moscow: Nedra. (1981)

22. Zenkov R.L. Bunkernye ustrojstva Moscow: Mashinostroenie. (1966)

23. Zenkov R.L. Mekhanika nasypnyh gruzov. Moscow: Mashinostroenie. (1964)

24. Gyachev L.V. Dvizhenie sypuchix materialov v trubax i bunkerax [The movement of bulk materials in pipes and bins] Moscow: Mashinostroenie, 184 p. (1968)

25. Gyachev L.V. Osnovy teorii bunkerov. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo universiteta. (1992).

26. Bohomiahkih V. A., Pepchuk A. P. Intensifikaciya razgruzki bunkernyx ustrojstv v usloviyax svodoobrazovaniya zernistykh materialov [The improvement of unloading of hopper devices in terms of grain bridging]. Zernograd. (1985)

27. Bogomyagkih V.A., Kunakov V.S., Voronov N.S. Mexanika vlazhnyx svodoobrazuyushhix zernovykh materialov v bunkerax [Mechanics of bridging wet grain materials in bins]. Zernograd: Rfriama, 100 p. (2000)

28. Varlamov A.V. The background for designing the mathematical model of dynamic system "Hopper device with bulk material —bridging — the mechanism of fracture of bridging Bulletin of the Samara State University of Communications. (2011)

29. Goryushinskij I. V. Yomkosti dlya sypuchix gruzov v transportno-gruzovykh sistemax [Containers for bulk cargo in the transportation and freight systems]: Samara: SamGAPS. (2003)

30. Bagnold R.A. Experiments on a gravity Free Dispersion of large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. Proc. Roy. Soc. London. (1954)

31. Jenkins J.T., Cowin S.C. Theories for Flowing granular Materials. Mech. Fluid Engng. and Bioengng. Conf., AMD (1979)

32. Savage S.B., Cowin S.C. Theories for Flow Granular Materials // American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y. (1999)

33. Sokolovskij V.V. Statika sypuchej sredy. Moscow: Nauka, 1990. – 272 s.

34. Geniev G.A. Dinamika plasticheskoy i sypuchej sred. Moscow: Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu, 1972. – 215 s.

35. Dziedzic K., Łapczyńska-Kordon B., Mudryk K. Decision support systems to establish plantations of energy crops on the example of willow (*Salix viminalis* L.). Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation. (2017)

36. Sous S. Gidrodinamika mnogofaznykh sistem. / S.Sous. Moscow: Mir. (1971)

37. Nigmatulin R.I. Osnovy mekhaniki getero-gennykh sred. / R.I. Nigmatulin. – Moscow: Nauka. (1978)

38. Krylov V.I. Vychislitel'nye metody t.2. Moscow: Nauka. (1976)

39. Tishchenko L.N. Intenifikaciya separirovaniya zerna. Har'kov: Osnova. (2004)

40. Tishchenko L.N. Vibroreshyotochnaya separaciya zernovykh smesej. Har'kov Mis'ruk. (2011)

41. Lavrent'ev M.A. Metody teorii funkciy kompleksnogo peremennogo. Moscow: Izd – vo fiziko – matematicheskoy lit. (1958)

42. Bogolyubov N.N. Asimptoticheskie metody v teorii nelinejnykh koleba-nij. / N.N. Bogolyubov, YU.A. Mitropol'skij. Moscow: Nauka. (1974)

## Анотація

### Дослідження процесу гравітаційного вивантаження живців енергетичної верби в умовах статичних і динамічних склепоутворень

С.В. Єрмаков, Т.Д. Гуцол

Одним з перспективних джерел відновлюваної енергії є енергія біомаси, яка володіє високим потенціалом для нарощування обсягів культивуванням таких культур як енергетична верба. Садіння верби здійснюється машинами, в яких садивний матеріал подається вручну, що істотно обмежує можливості підвищення ефективності агрегатів. При створенні автомата посадки такого матеріалу постало завдання швидкісної і точної подачі живців, що призвело до пошуку шляхів обґрунтування руху живців при вивантаженні з накопичувальної ємності. У роботі пропонується розглянути спосіб автоматизації садіння шляхом гравітаційного вивантаження посадкового матеріалу з щілинних бункерів. З практики функціонування бункерів відомо, що головною перешкодою здійснення витікання кускових матеріалів є явище склепоутворення, яке, перериваючи природне вивантаження матеріалів, негативно впливає на їх витратні характеристики. Дослідження процесу вивантаження і форми утворених склепінь говорить про те, що у випадку з таким матеріалом, як живці енергетичної верби, крім загальних причин утворення склепінь і закономірностей формування їх форми виникають ще й додаткові. Особливістю живців верби є їх стержнеподібна форма, що ускладнює склепоутворення, і викликає такі додаткові умови і фактори як перекося живців в шарі, нерівномірність їх защемлення по довжині і т.п. Виходячи з отриманих характеристик руху пропонується розглядати масив живців при їх вивантаженні як нестисливу двофазну псевдорідину, в якій живці є дискретною компонентою, а повітря, яке заповнює простір між ними виступає газоподібною складовою. При таких припущеннях процес вивантаження можна розглядати з точки зору багатофазних систем і до руху

живців застосовувати рівняння Нав'є-Стокса. Використання отриманих даних в подальших дослідженнях уможливить більш повно враховувати всі фактори, що виникають в процесі вивантаження і склепоутворення, що важливо при вивченні і вдосконаленні даного процесу.

**Ключові слова:** живець, автомат подачі, склепоутворення, бункер, математична модель, псевдодорідина, моделювання руху, енергетична верба.

**Abstract**

**Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in conditions of static and dynamic arch formations**

**S.V. Yermakov, T.D. Hutsol**

One of the promising sources of renewable energy is biomass energy, which has great potential for increasing the volume of cultivation of crops such as energy willow. Willow planting is carried out by machines in which the planting material is fed manually, which significantly limits the possibilities of increasing the efficiency of the units. When creating an automaton for planting such material, the problem arose of high-speed and accurate feeding of cuttings, which led us to search for ways to substantiate the movement of cuttings when unloading from a storage tank. The paper proposes to consider a method of planting automation by gravitational unloading of planting material from slotted bins. It is known from the practice of the functioning of bunkers that the main obstacle to unloading lumpy materials is the phenomenon of bridging, which, interrupting the natural flow of materials, negatively affects their consumption characteristics. The study of the process of unloading and the shape of the formed vaults suggests that in the case of such material as cuttings of energy willow, in addition to the general reasons for the formation of vaults and the regularities in the formation of their shape, others also arise. A feature of plant cuttings is their rod-like shape, which complicates bridging, and causes such additional conditions and factors as distortions of cuttings in the layer, irregular shape of cuttings, uneven pinching along the length, etc. Based on the obtained characteristics of the movement, it is proposed to consider the array of cuttings during their unloading as an incompressible two-phase pseudo-fluid, in which the cuttings are a discrete component, and the air filling the space between them acts as a gaseous compound. With such assumptions, the unloading process can be considered from the point of view of multiphase systems and the Navier-Stokes equation can be applied to the movement of the cuttings. The use of the obtained data in further studies will make it possible to more fully take into account all the factors arising in the process of unloading and bridging, which is important in the study and improvement of this process.

**Keywords:** cutting, hopper, automatic feeding, bridging, mathematical model, pseudoliquid, modeling of motion, energy willow.

**Бібліографічне посилання/ Bibliography citation: Harvard**

Yermakov, S. V. and Hutsol, T. D. (2021) 'Investigation of the process of gravitational unloading of energy willow cuttings in conditions of static and dynamic arch formations', *Engineering of nature management*, (3(21)), pp. 97 - 109.

*Подано до редакції / Received: 29.04.2021*