



## ОСОБЕННОСТИ ИСТЕЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ СТЕРЖНЕОБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ (НА ПРИМЕРЕ ЧЕРЕНКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИВЫ)

Serhii YERMAKOV<sup>1</sup>, Taras HUTSOL<sup>1</sup>

<sup>1</sup>STATE AGRARIAN AND ENGINEERING UNIVERSITY IN PODILYA, STR. SHEVCHENKO 13, 32300 KAMIANETS-PODILSKYI, UKRAINE

\*Corresponding author: e-mail: pro-gp@pdatu.edu.ua

### KEY WORDS

*bridging, unloading,  
cutting, energy willow,  
hopper, automatic  
feeding*

### ABSTRACT

*The paper considers the issues of unloading rod-shaped materials (cuttings of energy willow). Experimentally, during the unloading of the material, were fixed the bridging that arise during the flowing and were highlighted the features of the arches formation from the cuttings. Also analyzed the continuous unloading of the rod-shaped material and defined features of its flow. The results of the work can be used to further study the issues of unloading of such materials, as well as when designing storage hoppers in the systems of automatic feeding of willow energy cuttings in planting machines. of energy willow)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Множество машин, которые используются в производственных технологических линиях, имеют дело с такими рабочими процессами, как загрузка, выгрузка, отбор, транспортировка и т.п. различных материалов, которые зачастую состоят из однотипных частиц. Высокопроизводительная и качественная работа таких машин в значительной степени зависит от скорости выгрузки продукта, используемого оборудования и параметров и режимов работы разгрузочных устройств [1]. Вопросам совершенствования процесса выгрузки материалов посвящено много трудов, но, несмотря на значительные успехи в данной области, динамические процессы истечения сыпучих однородных материалов изучены недостаточно. Теоретическому и практическому изучению механики процессов истечения таких материалов посвящены работы ученых: Аипова Р. С., Беляева Ю. В., Березина Т. А., Бондаренко А. М., Василькова В. Б., Волгина Ю. Н., Гали А., Гениева Г. А., Егорова С. И., Жукова И. А., Клейна Г. К., Ковалева Н. И., Котова В. Л., Малинина Н. Н., Мурашова А. А., Нагорского И. С., Ничборса Б., Павленко Я., Пепчука А. П., Романова А. Н., Степука Л. Я., Трубицина М. Н., Ульянова С. В., Франчука В. П., Швоглера М., Шелла Д. и других.

Из практики функционирования бункеров известно, что главным препятствием осуществления выгрузки кусковых материалов является явление сводообразования, которое, прерывая естественное истечение материалов, отрицательно влияет на их расходные характеристики. Исчерпывающее теоретическое решение этой проблемы в научной литературе отсутствует. В области исследований динамики истечения сыпучих сред из емкостей, борьбы со сводообразованием и в сфере разработки сводообрушающего оборудования отметим значительный вклад следующих ученых Алферова К. В., Белоусова А. И., Блехмана И. И., Богомягких В. А., Горюшинского В. С., Горюшинского И. В., Гячева Л. В., Дженике Э. В., Ешуткина Д. Н., Желткова В. И., Зенкова Р. Л., Квапила Р., Кеглина Б. Г., Кунакова В. С., Локтионовой О. Г., Мулкжина О. П., Семенова В. Ф., Соколовского В. В., Третьякова Г. М., Ушакова Л. С., Яцуна С. Ф. 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.

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 параметры выпускного отверстия, и физико-механические свойства материалов, и условия загрузки, хранения и выпуска. Именно в связи со сложностью обеспечения равномерного непрерывного движения, исключающего процесс сводообразования, до настоящего времени не существует универсального питающего устройства, эффективно работающего с любым сыпучим материалом, а разнообразие требующего выгрузки материала способствует дальнейшим поискам обоснований движения того или иного продукта. 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 при необходимости обеспечения равномерного и непрерывного выгрузки 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 званых 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 [2] (рис.1).



**Рис.1.** Посадочный материал энергетической ивы.

Посадка насаждений энергетической ивы осуществляется машинами, в которых посадочный материал подается вручную, что существенно ограничивает возможности повышения эффективности агрегатов. При создании автомата посадки для такого посадочного материала возникла задача скоростной и точной подачи черенков, что привело нас к поиску путей обоснования движения черенков при выгрузке из накопительной емкости [3-5].

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:

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

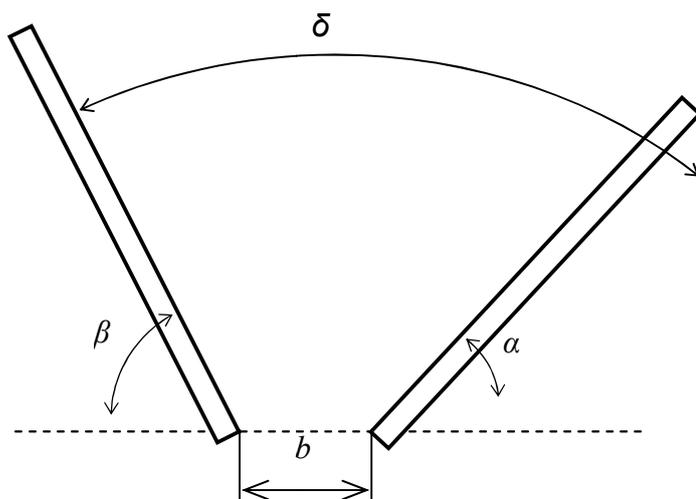
Оба направления актуальны, однако наиболее прогрессивно первое, так как лучше предотвратить сводообразование, чем бороться с ним [6]. Моделирование движения частиц выгружаемого сыпучего материала, как и выбор средств для разрушения образовавшихся в емкости сводов зависит от физико-механических свойств материала и параметров самой емкости.

В данной работе нас интересует поведение черенков энергетической ивы в процессе выгрузки 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 выгрузки 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.

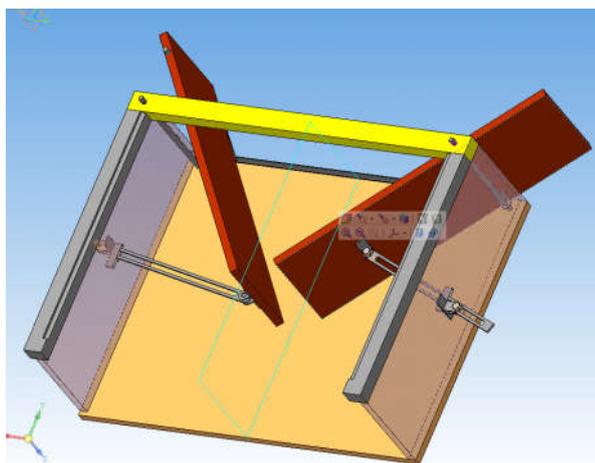
## **2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Выгрузка 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  $b$ .



**Рис. 2.** Модель бункера для выгрузки черенков энергетической ивы.

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 выгрузки материала (рис.3).



**Рис. 3.** Модель лабораторной установки

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

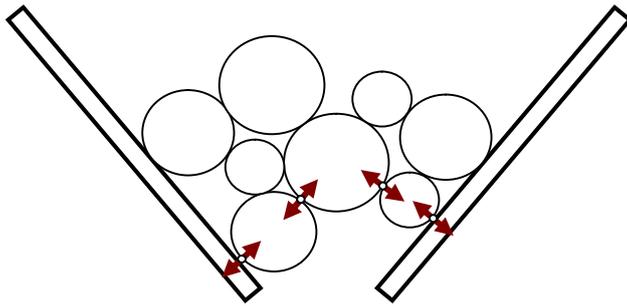
Использование данной модели бункера позволит исследовать характер истечения материала из бункера, а также определить краевые параметры для возможности такого истечения без сводообразований и, соответственно, без задержек.

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.

### **3. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ**

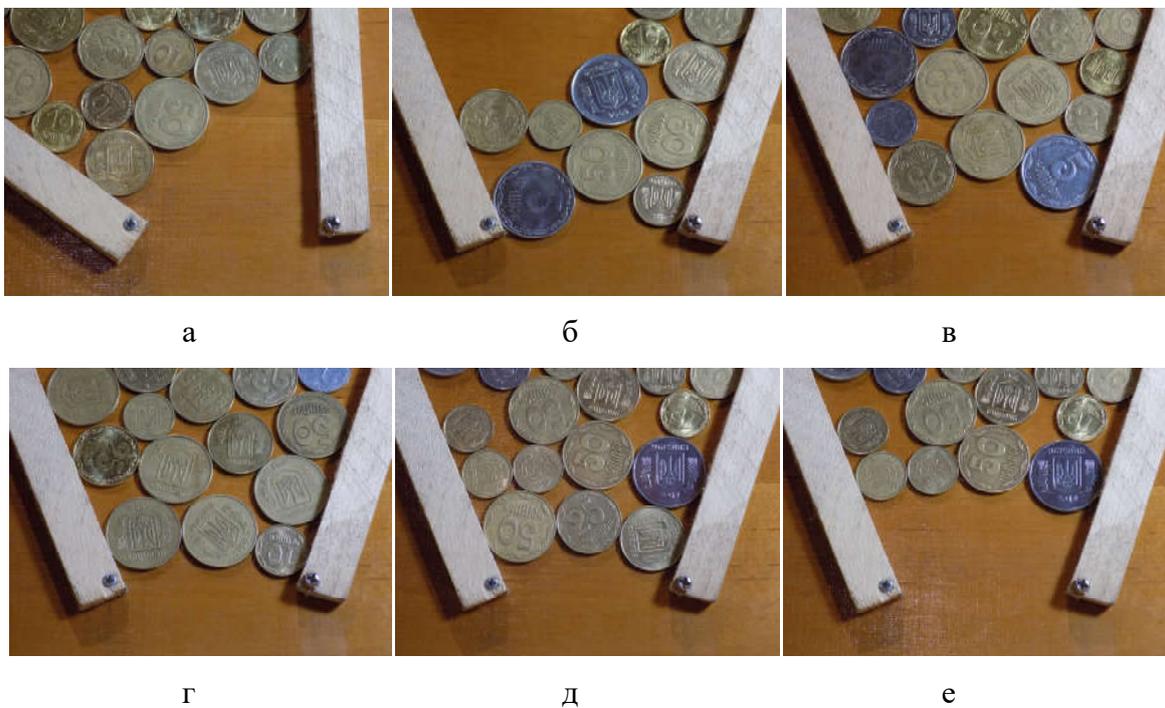
#### **3.1. СВОДООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ВЫГРУЖЕНИИ ЧЕРЕНКОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ИВЫ**

В работе И. В. Горюшинского, И. И. Кононова, В. В. Денисова, Е. В. Горюшинской, Н. В. Петрушкина дано следующее определение сводообразования: сводообразование – это образование сводов в емкостях в процессе выпуска сыпучего груза [7]. 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.).



**Рис. 4.** Схема сводообразования при высыпании черенков

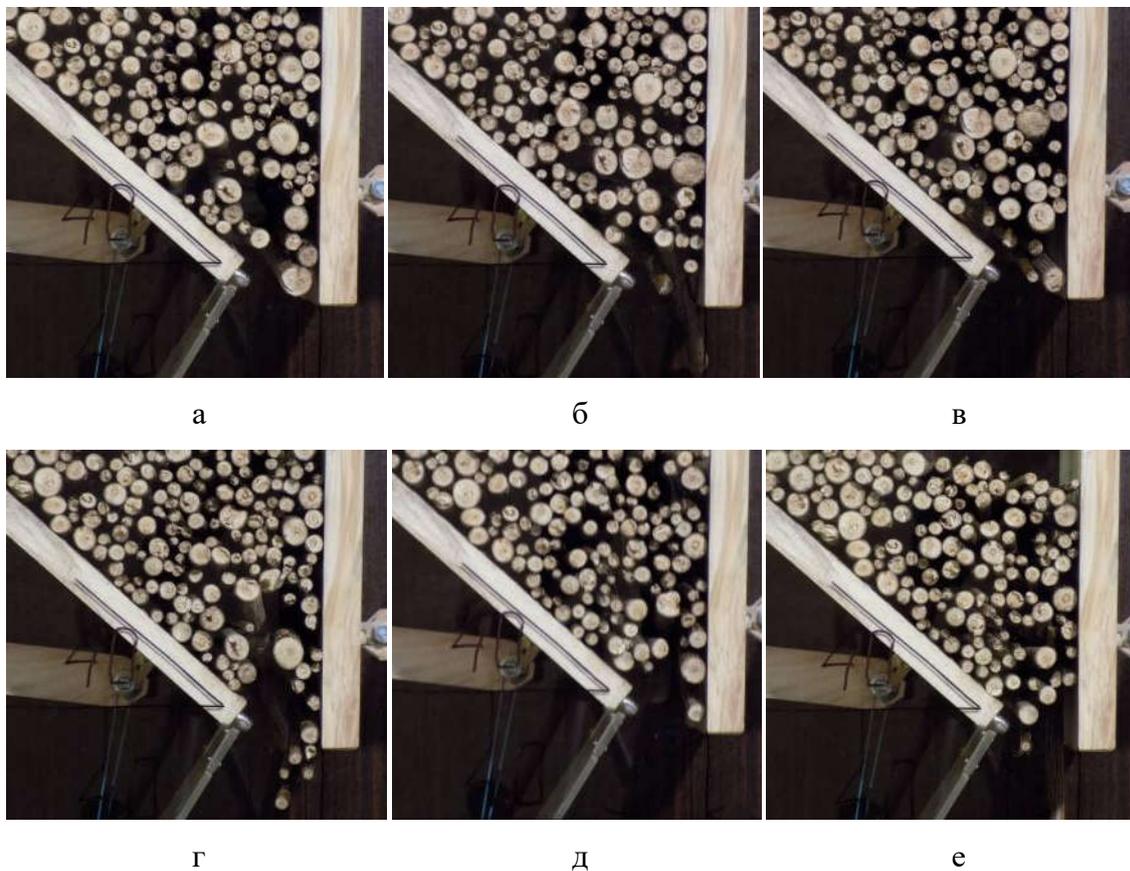
Для поиска возможных решений проблемы безостановочного истечения черенков энергетической ивы важно проанализировать возможные формы образующихся сводов. Учитывая, что, как было сказано выше, при использовании стержнеобразных материалов в ограниченной по их длине среде сводообразование можно рассматривать только в одной плоскости попробуем сравнить образование сводов в одной плоскости в контролируемых условиях, и непосредственно для массива черенков. Для первого случая возьмем цилиндрические тела разных диаметров. В нашем случае вполне подойдут монетки разного достоинства. Некоторые варианты сводов образованные при движении таких тел показано на рис.5.



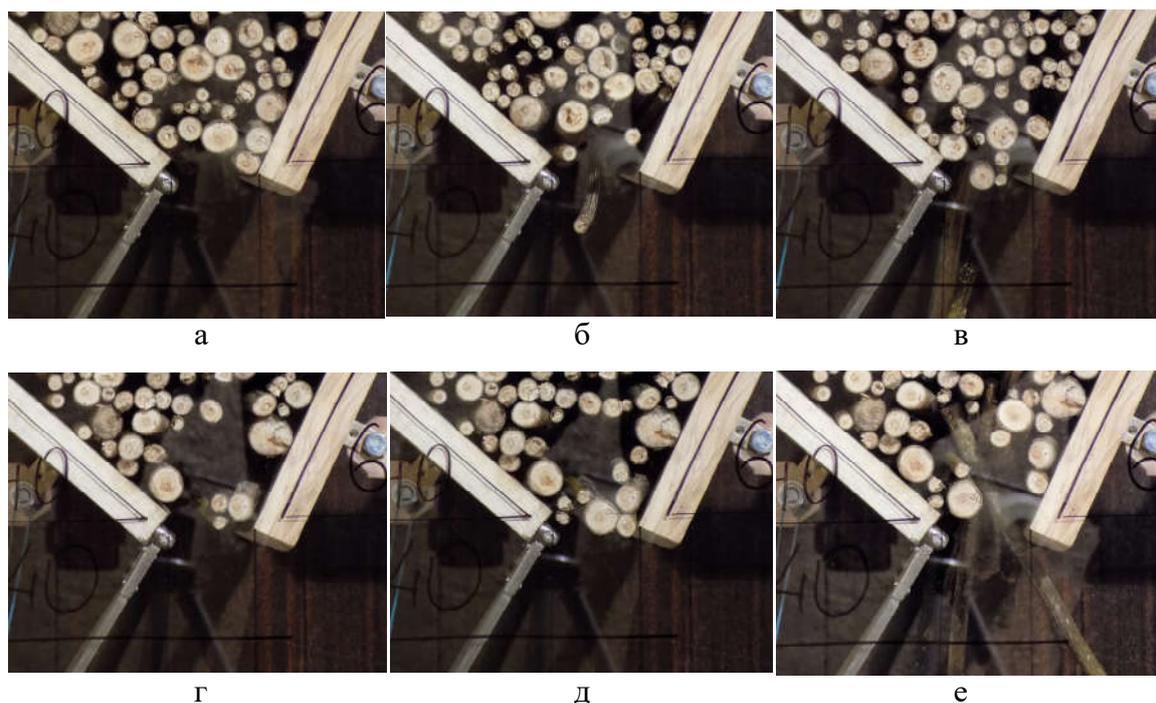
**Рис.5.** Примеры образованных сводов при выгрузении цилиндрических тел на плоскости.

Анализируя рис. 5 можно сделать вывод, что формирование свода в разрезе одной плоскости вполне может быть описано закономерностями взаимодействия между частицами в соответствии с занимаемыми ими положениями. Причем сами формы сводов хотя и носят случайный характер, но в целом формируются по одним и тем же закономерностям и в общих чертах вполне могут быть спрогнозированы.

Принимая во внимание размерные характеристики черенков растений, не трудно спрогнозировать, что на процесс сводообразования может влиять еще и длина черенков. На рис. 6 показано некоторые варианты зафиксированных сводов при выгрузении черенков через выгрузное отверстие при углах  $\alpha=90^\circ$  и  $\beta=40^\circ$ , а на рис.7 – то же при углах  $\alpha=65^\circ$  и  $\beta=40^\circ$ .



**Рис.6.** Примеры образованных сводов при выгрузении черенков энергетической ивы.



**Рис.7.** Примеры образованных сводов при выгрузке черенков энергетической ивы.

Таким образом, видим, что формы сводов существенно отличается от предыдущих сводов образованных в одной плоскости (рис.5). 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. 6 - б, г, е, а также рис.7 – 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.

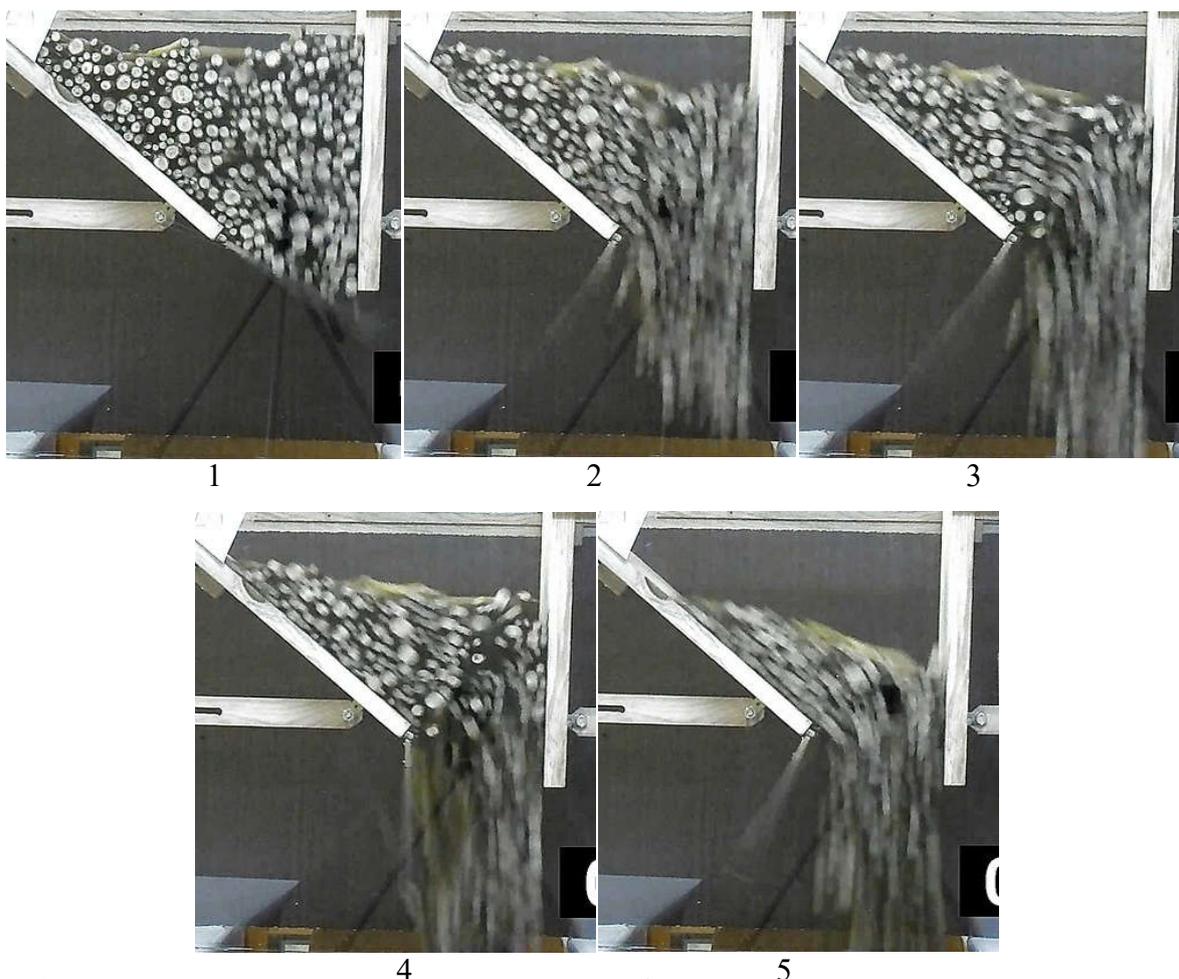


**Рис. 8.** Проблемы выгрузки черенков энергетической ивы в зоне выгрузного окна

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

### **3.2. 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 выгрузки 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 стенах происходит за одними и теми же принципами, посмотрим на фазы истечения при форме бункера с одной вертикальной стенкой (рис. 9).



**Рис. 9.** Фазы истечения черенков энергетической ивы из бункеров при углах наклонных полуплоскостей  $\alpha=90^\circ$  и  $\beta=40^\circ$

При выгрузке черенков из бункера с одной вертикальной стенкой сначала начинают двигаться черенки, которые находятся над выгрузочным окном вдоль вертикальной стенки (рис. 9 – 1 и 2). На наклонной стенке расположенной под углом  $40^\circ$  черенки образуют малоподвижный 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. 9 – 2 и далее). Через некоторое время в образовавшуюся пустоту обрушивается материал (рис. 9 – 4 и 5), который до того был малоподвижным (верхние слои над наклонной стенкой). В результате образуется столкновения обрушивающихся слоев со слоями нормального высыпания, которые еще не успели оставить отверстие (рис. 9 – 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. 9 – 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.10).



**Рис. 10.** Окончание выгрузки черенков при углах установки наклонных стенок  $\alpha=65^\circ$  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.

#### **4. ВЫВОДЫ**

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.

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

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.

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.

## 5. БИБЛИОГРАФИЯ

1. Адамчук, В.В.; Баранов, Г.Л.; Барановський О.С.: Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки: Кравчук, В.І., Грицишин, М.І., Коваль С.М. (Red.). Київ: Аграрна наука (2004).
2. Frączek J., Mudryk K., Ślipek Z.: Wierzba salix viminalis alternatywą energetyczną dla gospodarstw rolnych w Małopolsce. *Inżynieria Rolnicza*. 3/58. (2004).
3. Єрмаков, Сергій, Tulej, Marcin, Tulej, Weronika, Шевчук, Ігор: Аналіз конструкцій автоматів садіння Матеріали XXXIV Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Тенденції та перспективи розвитку науки і освіти в умовах глобалізації» Випуск 34. Переяслав-Хмельницький. (2018)
4. Єрмаков, С.В.: Перспективи удосконалення конструкцій для садіння живців енергетичних культур // Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка 2 (26). (2017).
5. Yermakov, S.; Borys, M.: Efficiency analysis of the energy willow planting devices. *Materialy XI Mezinarodni vedecko-prakticka konference "Veda a vznik - 2015"*, vol. 14, pp. 47-49. Publishing House "Edukation and Science", Praha. (2015).
6. Минько, Р. Н.: Проблема сводообразования в емкостях бункерного типа в условиях длительного хранения. *Ярославский педагогический вестник*, 3(1). (2013).
7. Горюшинский, И. В.: Емкости для сыпучих грузов в транспортно-грузовых системах: учебное пособие. – Самара : СамГАПС, (2003).
8. Ivanyshyn, V.; Hutsol, T.: The Ukrainian Agricultural Groups State and Agromachinery Revision. *Scientific achievements in agricultural engineering, agronomy and veterinary medicine polish ukrainian cooperation*, Vol. 1, p. 5-18. Available: <http://188.190.33.56:7980/jspui/handle/123456789/10>. Access: 25th November, 2018. (2017).
9. Єрмаков С.В. Обґрунтування параметрів гравітаційного вивантаження живців енергетичних культур. Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перші наукові кроки-2018» (2018)
10. Богомягих, В. А., Пепчук, А. П.: Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зернистых материалов / В. А. Богомягих, А. П. Пепчук. – Зерноград. (1985).

11. Savage, S.B., Cowin S.C.: Theories for Flow Granular Materials // American Society of Mechanical Engineers, Buffalo, N.Y. (1999).
12. Гениев, Г. А., Эстрин, М.И.: Динамика пластической и сыпучей сред. Москва: Издательство литературы по строительству. (1972).
13. Гячев, Л.В.: Основы теории бункеров. Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета. (1992).
14. Ovcharuk, O.; Hutsol, T.D.; Ovcharuk, O. Ecological trends and perspectives of using plants biomass for the development of alternative fuels in Ukraine. Agrarian science and education in the european integration context, p.29-31. Available: <http://188.190.33.56:7980/jspui/bitstream/123456789/1454/1/ANOUE-18-1-29-31.pdf>. Access: 25th November, 2018. (2018)
15. Pantsyr, Y., Garasymchuk, I., Hutsol, T., & Gordiychuk, I.. Energy Parameters' Calculation of a Hybrid Heat Supply System for a Private House in the Conditions of Western Part of Ukraine. Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation. (2018)

**Address for correspondence:** PhD, Associate Professor, Hutsol Taras, State Agrarian and Engineering University in Podilya, 13, Shevchenko str., Kamyanets-Podolsky, Ukraine, 32300, e-mail: [pro-gp@pdatu.edu.ua](mailto:pro-gp@pdatu.edu.ua)