

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-5>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN515.pdf>

DOI: 10.15862/40TVN515 (<http://dx.doi.org/10.15862/40TVN515>)

**УДК 631.354.024/.028**

**Скудина Александра Александровна**

ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет»

Россия, г. Ростов-на-Дону<sup>1</sup>

Старший преподаватель

E-mail: [Aspirant-2004@mail.ru](mailto:Aspirant-2004@mail.ru)

РИНЦ: [http://elibrary.ru/author\\_profile.asp?id=774517](http://elibrary.ru/author_profile.asp?id=774517)

**Богомягих Владимир Алексеевич**

ФГБОУ ВПО «Донской государственный аграрный университет»

Азово-Черноморский инженерный институт

Россия, г. Зерноград

Профессор

Доктор технических наук

## **О физической сущности сводообразующего истечения зерновых сыпучих материалов из бункеров наибольшей пропускной способности**

---

<sup>1</sup> 344049, г. Ростов-на-Дону, ул. Еременко 101, кв. 432

**Аннотация.** В статье рассматриваются теоретические зависимости, определяющие, расходные характеристики бункеров, учитывающие форму частиц сыпучего материала и его скважность при выходе из выпускного отверстия бункера; сводообразующие факторы при статическом и динамическом сводообразовании дискретных частиц сыпучего материала и пульсирующий характер его истечения; вид истечения и форму бункера, из которого он истекает. Сложность решения данной задачи обусловлена многообразием сыпучих материалов и условиями их взаимодействия с рабочими поверхностями бункерных установок. Поэтому в каждом конкретном случае для аналитического решения этой задачи необходима вполне конкретная научно обоснованная модель сыпучего материала, достаточно полно отвечающая его физико-механическим свойствам.

В статье приводятся результаты аналитического решения непрерывности и устойчивости истечение сыпучих материалов из осесимметричных бункеров наибольшего расхода, получены функциональная зависимость расхода сыпучего материала и время истечения из осесимметричных бункеров наибольшего расхода. Вид образующих стен этих бункеров аналогичен граничным линиям скольжения потоков зерновых материалов при их нормальном истечении из осесимметричных бункеров наибольшего расхода.

**Ключевые слова:** щелевые бункера максимального расхода; зерновой материал; образующая стенка бункера; модель зернового материала; форма щелевого бункера максимального расхода; плотность дискретных частиц; форма продольного сечения бункера; сводчатые структуры.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

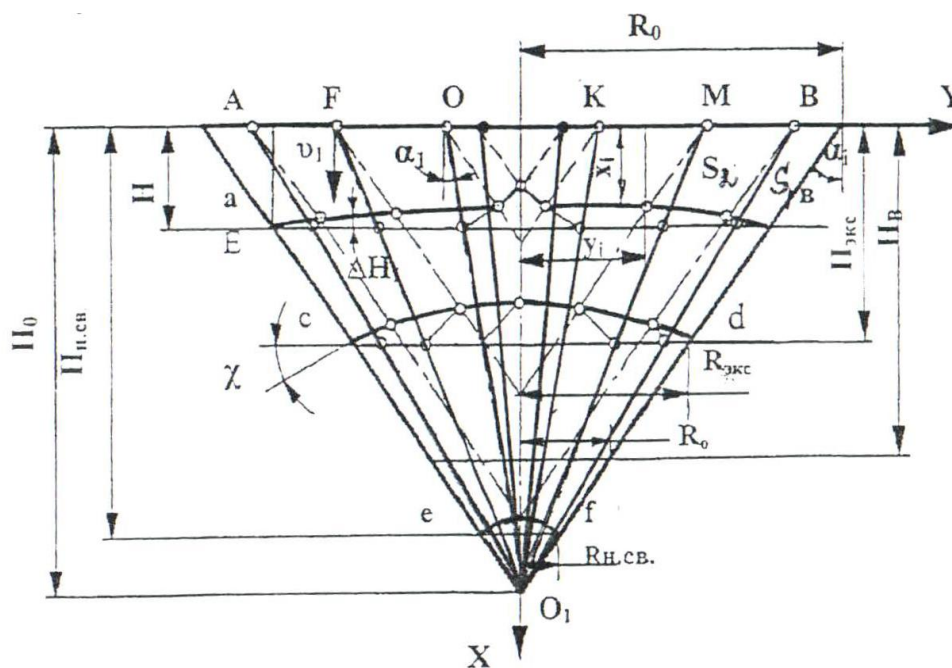
Скудина А.А., Богомягих В.А. О физической сущности сводообразующего истечения зерновых сыпучих материалов из бункеров наибольшей пропускной способности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/40TVN515.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/40TVN515

В настоящее время для исследования механики легкосыпучих зернистых материалов чаще всего используется комбинированная механическая модель сыпучего тела Л.В. Гячева - В.А. Богомягих [1, 2, 7]. Эта модель представляет собой совокупность допущений моделей сыпучего тела Л.В. Гячева и В.А. Богомягих.

Обоснованием выбора этой модели служит то, что в теории Л.В. Гячева истечение сыпучих тел из выпускных отверстий бункеров происходит по линиям скольжения, сходящимся в точке  $O_i$  (рисунок 1).

Этот характер перемещения частиц в потоке сыпучего тела возможен только в том случае, если в процессе движения частицы сближаются по оси слоя (по оси АВ), выбирая в точках контакта с соседними по слою частицами "зазор".

Очевидно, что при таком характере движения частиц в потоке в бункере могут возникать перемычки, но никогда не возникнут своды. Движение потока в этом случае будет подчиняться закономерностям, которые установил проф. Л.В. Гячев на основе бессводообразующей модели дискретного сыпучего тела.



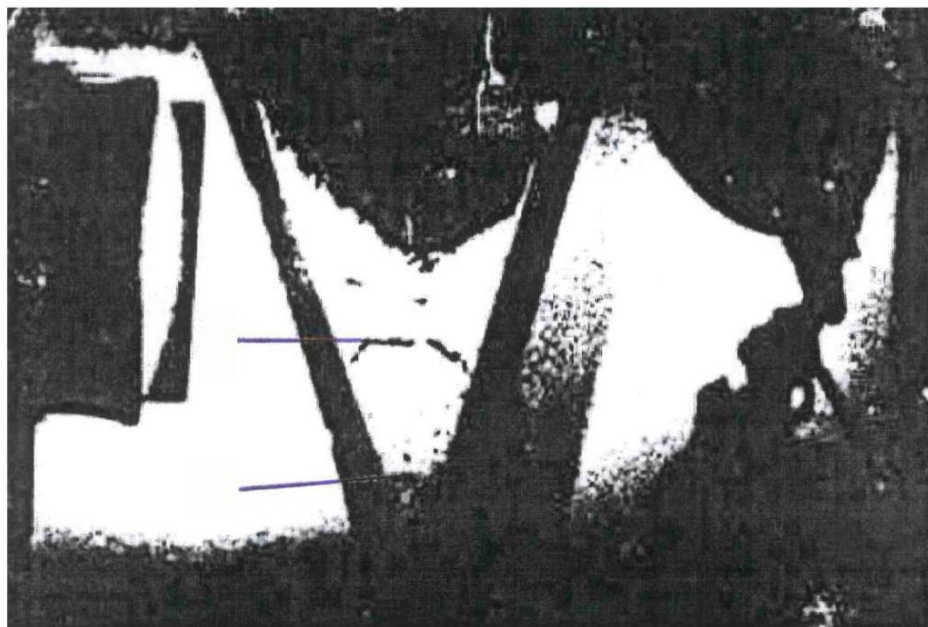
**Рис. 1.** Схема формирования сводов в бункере при истечении сыпучего тела [1]

В действительности движение частиц с конечными размерами в сужающемся потоке происходит не по сходящимся в точке  $O_i$  линиям скольжения, а по линиям скольжения, параллельным (эквидистантным) образующей поверхности скольжения потока (рисунок 2). На рисунке 1 эти линии скольжения показаны пунктиром. При этом, как показала скоростная киносъемка, скорость перемещения частиц по действительным линиям скольжения не превышает скорости перемещения частиц по сходящимся в точке  $O_i$  линиям скольжения.



*Рис. 2. Действительные линии скольжения реальных частиц сыпучего тела в бункере (движение стальных шариков) [1]*

Движение по действительным пересекающимся по оси бункера линиям скольжения обуславливает образование в бункере либо динамических, либо статически устойчивых сводов (рисунок 3).



*Рис. 3. Кадр скоростной съемки одновременного образования статически устойчивого и динамического сводов из шарообразных пластмассовых гранул [3]*

В первом случае истечение сыпучего тела из выпускного отверстия бункера будет пульсирующим, а во втором случае оно полностью прекратится.

В момент образования динамических сводов справедлива модель сыпучего тела В.А. Богомягких, а в периоды между их образованием - модель сыпучего тела Л.В. Гячева. Поэтому эта модель сыпучего тела получила название комбинированной механической модели сыпучего тела. Она справедлива для сыпучих материалов, подчиняющихся закону сухого трения (закону Кулона) и закону Амонтона - Кулона.

В основу теоретического исследования данной диссертации положена научная гипотеза о том, что существует такая форма образующей стенки бункера, которая дает возможность получать из него наибольшие расходы зернового сыпучего материала с одновременным его равномерным распределением по площади выпускного отверстия бункера.

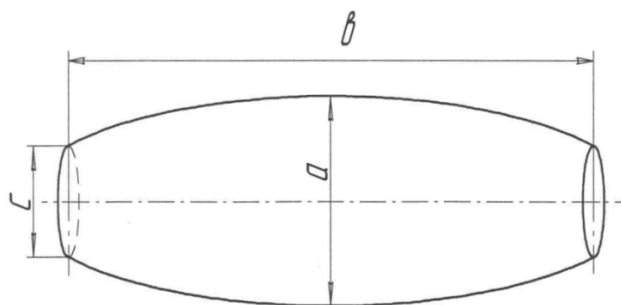
В механике сыпучих тел, при теоретическом решении задач, связанных с исследованием процессов хранения, дозирования, транспортирования и истечения зернистых сыпучих материалов, определение условного диаметра дискретных реальных частиц осуществляется по известной формуле проф. Л.В. Гячева. [1, 3]

$$d_y = \sqrt[3]{abc}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $b$  и  $c$  - соответственно, длина (высота), ширина и толщина реальной частицы, м.

Из формулы (1) следует, что  $d_y$  равен среднегеометрическому размеру частицы независимо от ее формы. Однако, как показывает производственный опыт и результаты экспериментальных исследований [4], форма реальной частицы оказывает существенное влияние на протекание указанных процессов, а также на конструктивные и технологические параметры устройств, реализующих эти процессы.

В природе формы реальных частиц зернистых материалов многообразны, но, однако, каждая из них может быть выражена одной из пространственных фигур стереометрии. Например, семена гороха близки по форме к шару; кукурузы - к пространственному клину или пирамиде; зерно пшеницы - к параболическому бочонку (рисунки 4 и 5); семена подсолнечника - к прямому конусу или пирамиде и т.д.



**Рис. 4.** Схема зерна пшеницы [7]



**Рис. 5.** Натуральная форма зерна пшеницы [7]

Поэтому, исходя из принципов геометрического подобия, любую по форме реальную частицу, например слепленную из пластилина, можно обратить в шарообразную, с сохранением ее объема и массы. Отсюда следует, что для определения  $d_y$  реальных частиц можно их объемы из ряда фигур стереометрии приравнять к объему шара. [5, 7]

Отсюда следует, что условный диаметр любой реальной частицы равен не среднегеометрическому ее размеру, а произведению коэффициента ее формы на ее среднегеометрический размер, то есть,

$$d_y = k_{\phi} \zeta_{сг.р}, \quad (2)$$

где  $k_{\phi}$  - коэффициент формы реальной частицы;

$\zeta_{сг.р}$  - среднегеометрический размер реальной частицы, м.

$\zeta_{сг.р}$  также можно назвать размерным коэффициентом искаженной формы реальной частицы от шаровой с условным ее диаметром « $d_y$ ».  $\zeta_{сг.р} = k_{и.ф}$ .

Коэффициент  $k_{\phi}$  показывает - во сколько раз  $d_y$  по своим размерам отличается от среднегеометрического размера реальной частицы. Как следует из указанных выражений, относительная разница между  $d_y$  и  $\zeta_{сг.р}$  по абсолютному значению составляет: для шаровидных частиц - 0%; для частиц в форме прямого цилиндра - 14%; в форме прямого конуса - 20%, в форме прямого параллелепипеда - 24%; в форме правильной пирамиды - 14%; в форме пространственного клина - 2%; в форме параболической бочки - 53%.

Исходя из принятой модели зернового материала и на основании проведенных аналитических исследований и производственного опыта, процесс истечения дискретных сыпучих тел из бункеров повышенной пропускной способности можно описать следующим образом.

В момент открытия заслонки выпускного отверстия бункера движение зернового потока в нем некоторое (небольшое) время будет неустановившимся (до момента разрушения наиболее удаленного от выпускного отверстия динамического свода, образовавшегося при загрузке бункера зерновым материалом).

Процесс разрушения динамических (неустойчивых) сводов стохастичен и описывается дифференциальными линейно-разностными уравнениями состояния (марковскими стационарными процессами).

$$P_0(t) = (1 - \exp(-\mu \cdot t))^n, \quad (3)$$

где  $\mu$  - частота разрушения динамических сводов (количество разрушившихся сводов за единицу времени), зависящая от физико - механических свойств сыпучих материалов и конструктивных параметров бункера;

$n$  - общее количество сводов.

При этом, время неустановившегося режима истечения зерновых материалов из бункера может быть определено

$$t = \left( \frac{1}{\mu} \right) \cdot \ln \left( \frac{1}{1 - \sqrt[n]{a^*}} \right), \quad (4)$$

где  $a^*$  - заданная вероятность, число, достаточно близкое к единице.

При установившемся режиме истечения зерновых материалов происходит непрерывный процесс образования и разрушения динамических сводов по всей высоте

движущегося потока. Динамические своды в этом случае образуются через произвольные интервалы времени и имеют различные периоды существования. Вероятности состояния этого процесса описываются законом распределения Пуассона

$$P_n(t) = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot \frac{(1 - \exp(-\mu \cdot t))^n}{n!} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{\lambda}{\mu}\right) \cdot (1 - \exp(-\mu \cdot t))\right\}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – частота образования сводов, зависящая от физико-механических свойств сыпучих материалов и конструктивных параметров бункера.

Непрерывность и устойчивость истечения наблюдается, если  $\lambda = \mu$ . Накопление неразрушившихся динамических сводов, приводящих к полному прекращению истечения зерновых материалов из бункеров, наблюдается, если  $\lambda > \mu$ . При этом, функциональная зависимость расхода сыпучего из бункера имеет вид

$$q = \rho \cdot S \cdot (S \cdot g^2)^{1/4} \cdot f\left(\frac{D}{d} \cdot \alpha\right), \quad (6)$$

где  $q$  – расходная характеристика бункера;

$\rho$  – насыпная плотность сыпучего материала;

$S$  – площадь выпускного отверстия бункера;

$g$  – ускорение силы тяжести;

$D/d_y$  – отношение диаметра выпускного отверстия бункера к условному диаметру частицы зернового материала;

$\alpha$  – угол наклона стенок днища бункера к вертикали.

Из вышеуказанного следует, что процесс истечения зерновых материалов из бункеров есть естественный процесс быстрого во времени образования и разрушения динамических сводов по всей высоте движущегося дискретного потока.

Этот процесс стохастичен и подчиняется марковским процессам.

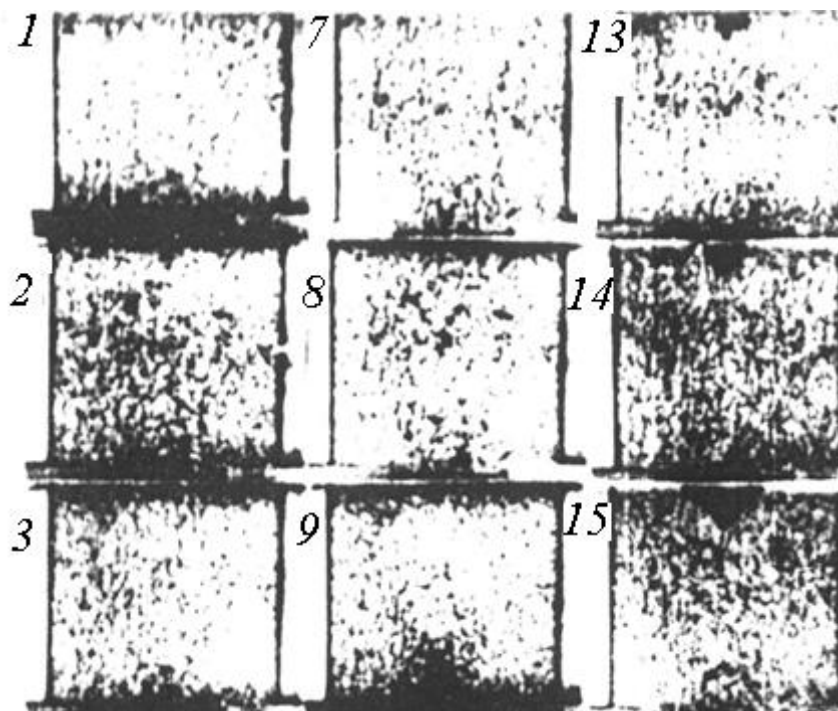
При определенных условиях (когда  $R_b \leq R_{н.св.}$ ) динамические своды переходят в статически устойчивые. Это происходит тогда, когда веревочный многоугольник сил, действующий на этот свод, замыкается. То есть, в этом случае равнодействующая всех сил, действующая на этот свод, равна нулю. Если она не равна нулю, то статически устойчивый свод становится неустойчивым (динамическим) и он разрушается.

Периодическое стохастическое образование и разрушение этих сводов по всей высоте движущегося потока в бункере обуславливает в нем периодическое стохастическое разрыхление и уплотнение зернового сыпучего материала и, следовательно, обуславливает пульсирующий его выход из выпускного отверстия бункера. Кадры скоростной съемки это подтверждают (рисунок 6).

На кадрах скоростной съемки отчетливо видно периодическое стохастическое уплотнение и разрыхление движущегося потока зерна. Также наблюдается визуальное образование и разрушение динамических сводов (кадры: 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 14, 15). Процесс образования и разрушения динамических сводов наблюдается в течение всего времени опорожнения бункера.



Из сказанного следует, что процесс сводообразования сыпучих материалов, находящихся в граничных условиях, есть естественное явление, присущее потокам зернистых тел. Это естественное явление образования и разрушения сводчатых структур обусловлено расположением дискретных частиц по линиям равного сопротивления их движению в потоке сыпучего, которые называются изолиниями. Процесс это стохастический как по времени образования и разрушения сводчатых структур, так и по месту их образования и разрушения в объеме граничных условий (например, в объеме бункера). [6, 8]



**Рис. 6.** Кадры скоростной съемки истечения зерна пшеницы из бункерах [9]

Этот процесс наблюдается при любом виде истечения дискретных сыпучих тел из выпускных отверстий бункеров.

Этот процесс одновременно дискретен и непрерывен. Его дискретность проявляется в пульсирующем характере истечения сыпучего, а его непрерывность – в ламинарности (равномерности) движения потока в бункере с момента его формирования и до момента его полного выхода из бункера. [9, 10]

В бункерах повышенной пропускной способности, образуются, как указывает в своей работе Л.В. Гячев [2], «скользящие» динамические своды, у которых  $\lambda_0 \cong 1$ .

Таким образом, для указанных бункеров зависимость принимает вид

$$T_{n_2} = \frac{V_{d_y}}{q_{np}}, \text{ с.}; \mu_2 = \frac{q_{np}}{V_{d_y}}, \text{ Гц.} \quad (7)$$

В результате приходим к схеме истечения слоя частиц, находящихся непосредственно над плоскостью выпускного отверстия бункера и, следовательно, частота  $\mu_2$  выхода этого слоя частиц из выпускного отверстия бункера наибольшей пропускной способности определится из выражения



$$\mu_2 = \frac{q_{np}}{V_{d,y}}, \Gamma \text{ц.} \quad (8)$$

Тогда, соответственно, для усеченного конического и щелевого бункеров:

$$\mu_{y.к} = \frac{\left(\frac{g}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha'_0}\right)^{0,5} (R_6^{2,5} - R_{н.сб}^{2,5}) \frac{\rho}{\eta}}{R_6^2 \cdot d_y}, \quad (9)$$

$$- \mu_{щ} = \frac{\left(\frac{g}{\operatorname{tg} \alpha'_0}\right)^{0,5} (R_6^{1,5} - R_{н.сб}^{1,5}) \frac{\rho}{\eta}}{R_6 \cdot d_y}. \quad (10)$$

Из анализа этих зависимостей следует, что с увеличением значений  $R_{н.сб.}$ ,  $\rho$  и  $d_y$  при всех остальных постоянных аргументах значение частоты пульсации  $\mu$  понижается, а с увеличением  $R_в$  и  $\eta$  также при всех остальных постоянных аргументах значение  $\mu$  повышается.

Известно, что в бункерах с прямой образующей их стен среднестатистическая осевая податливость динамических сводов не превышает 0,75, а  $V_{d,y} \approx V_e$ . То есть, среднестатистический пульс  $T_{п}$  истечения дозы сыпучего у них, как следует из формулы (6) –

$$V_{d,y} / 0,75 \cdot q_{np} \left( \mu_1 = \frac{0,75 q_{np}}{V_{d,y}} \right).$$

Отношение  $\mu_2$  к  $\mu_1$  дает численное значение  $\sim 1,3$ . То есть, равномерность выхода доз сыпучего из выпускного отверстия бункера наибольшей пропускной способности, примерно, в 1,3 раза выше, чем у бункера, образующие стен которых – прямые линии.

В результате аналитического исследования установлено:

- 1 Принятая модель сыпучего зернового тела позволяет решать задачи, связанные с обоснованием формы и параметров бункеров наибольшей пропускной способности, обеспечивающие, в то же время, равномерное истечение сыпучего из их выпускных отверстий.
2. Процесс истечения сыпучих материалов из бункеров наибольшего расхода есть процесс быстрого во времени образования и разрушения «скользящих» динамических сводов с их осевой податливостью, близкой к единице.
3. Равномерность выхода доз сыпучего материала из выпускных отверстий бункеров наибольшей пропускной способности, примерно, в 1,3 раза выше, чем у производственных.
4. Минимальный размер выпускного отверстия бункера должен быть больше его наибольшего сводообразующего размера.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гячев П.В. Основы теории бункеров – Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 1992. – 309 с.
2. Богомягких В.А., Пепчук А.П. Интенсификация разгрузки бункерных устройств в условиях сводообразования зернистых материалов – зерноград, ВНИПТИМЭСХМ, 1996. – 164 с.
3. Богомягких В.А. Теория и расчет бункеров для зернистых материалов. - Ростов-на-Дону: РГУ, 1973. – 148 с.
4. Богомягких В.А., Ялтанцев В.Г., Семененко Т.Н. Процесс образования сводов в силосах и бункерах при истечении сыпучих материалов // В. кн.: Механика деформируемых систем в сельхозмашиностроении. - Ростов-на-Дону: РИСХМ, 1974. – с. 115-164.
5. Алферов К.В. Бункеры, затворы, питатели.– Москва: Машгиз, 1946. – 178 с.
6. Бугаев В.Т., Науменко Я.В. О распределении давления по высоте стенки в процессе образования засыпки // Механика сыпучих материалов: Тез. докл. Всесоюз. конф. – Одесса, 1980. - с. 138-139.
7. О форме и условном диаметре реальных частиц зернового материала Богомягких В.А., Несмиян А.Ю., Климович А.С., Ляшенко А.Л., Скудина А.А. Вестник аграрной науки Дона. 2014. Т. 2. №26. С. 30-34. ISSN: 2075-6704.
8. Богомягких В.А., Скудина А.А. Влияние некоторых сводообразующих факторов на время истечения зерновых из бункера наибольшего расхода. Молодой ученый. 2015. №14. с. 133-136. ISSN: 2072-0297.
9. Богомягких В.А., Скудина А.А. О частоте пульсации сыпучего тела, выходящего из выпускного отверстия бункера наибольшего расхода. Молодой ученый. 2015. №14. с. 139-142. ISSN: 2072-0297.
10. Скудина А.А. О скважности зернового потока, выходящего из выпускного отверстия бункера наибольшей пропускной способности. Молодой ученый. 2015. №14. с. 188-191. ISSN: 2072-0297.

**Рецензент:** Загутин Дмитрий Сергеевич, профессор, д.ф.н., к.т.н., «Донской государственный технический университет».

**Skudina Alexandra Alexandrovna**

Don State Technical University  
Russian Federation, Rostov-on-Don  
E-mail: Aspirant-2004@mail.ru

**Bogomyagkikh Vladimir Alexeevich**

Azov-Black Sea State Agroengineering Academy  
Russian Federation, Zernograd

## **About physical essence of the svodoobrazuyushchy expiration of grain bulks from bunkers of the greatest capacity**

**Abstract.** In article the theoretical dependences defining the account characteristics of bunkers considering a form of particles of bulk and its porosity at an exit from the bunker outlet are considered; svodoobrazuyushchy factors at a static and dynamic svodoobrazovaniye of discrete particles of bulk and the pulsing nature of its expiration; a type of the expiration and a form of the bunker from which it expires. Complexity of the solution of this task is caused by variety of bulks and conditions of their interaction with working surfaces of bunker installations. Therefore in each case quite concrete evidence-based model of bulk which is rather fully answering to its physicommechanical properties is necessary for the analytical solution of this task.

Results of the analytical solution of a continuity and stability the expiration of bulks from axisymmetric bunkers of the greatest expense are given in article, functional dependence of a consumption of bulk and time of the expiration from axisymmetric bunkers of the greatest expense are received. The type of the forming walls of these bunkers is similar to boundary lines of sliding of streams of grain materials at their normal expiration from axisymmetric bunkers of the greatest expense.

**Keywords:** slot-hole the bunker of the maximum expense; grain material; the forming bunker wall; model of grain material; a form of the slot-hole bunker of the maximum expense; density of discrete particles; a form of longitudinal section of the bunker; vaulted structures.

## REFERENCES

1. Gyachev P.V. Osnovy teorii bunkerov – Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo universiteta, 1992. – 309 s.
2. Bogomyagkikh V.A., Pepchuk A.P. Intensifikatsiya razgruzki bunkernykh ustroystv v usloviyakh svodoobrazovaniya zernistykh materialov – Zernograd, VNIPTIMESKhM, 1996. – 164 s.
3. Bogomyagkikh V.A. Teoriya i raschet bunkerov dlya zernistykh materialov. - Rostov-na-Donu: RGU, 1973. – 148 s.
4. Bogomyagkikh V.A., Yaltantsev V.G., Semenenko T.N. Protsess obrazovaniya svodov v silosakh i bunkerakh pri istechenii sypuchikh materialov // V. kn.: Mekhanika deformiruemykh sistem v sel'khoz mashinostroenii. - Rostov-na-Donu: RISKhM, 1974. – s. 115-164.
5. Alferov K.V. Bunkery, zatvory, pitateli.– Moskva: Mashgiz, 1946. – 178 s.
6. Bugaev V.T., Naumenko Ya.V. O raspredelenii davleniya po vysote stenki v protsesse obrazovaniya zasypki // Mekhanika sypuchikh materialov: Tez. dokl. Vsesoyuz. konf. – Odessa, 1980. - s. 138-139.
7. O forme i uslovnom diametre real'nykh chastits zernovogo materiala Bogomyagkikh V.A., Nesmiyan A.Yu., Klimovich A.S., Lyashenko A.L., Skudina A.A. Vestnik agrarnoy nauki Dona. 2014. T. 2. №26. S. 30-34. ISSN: 2075-6704.
8. Bogomyagkikh V.A., Skudina A.A. Vliyanie nekotorykh svodoobrazuyushchikh faktorov na vremya istecheniya zernovykh iz bunkera naibol'shego raskhoda. Molodoy uchenyy. 2015. №14. s. 133-136. ISSN: 2072-0297.
9. Bogomyagkikh V.A., Skudina A.A. O chastote pul'satsii sypuchego tela, vykhodyashchego iz vypusknoy otverstiya bunkera naibol'shego raskhoda. Molodoy uchenyy. 2015. №14. s. 139-142. ISSN: 2072-0297.
10. Skudina A.A. O skvazhnosti zernovogo potoka, vykhodyashchego iz vypusknoy otverstiya bunkera naibol'shey propusknoy sposobnosti. Molodoy uchenyy. 2015. №14. s. 188-191. ISSN: 2072-0297.