

## К ОБОСНОВАНИЮ ИСТЕЧЕНИЯ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ В ПИТАЮЩЕМ УСТРОЙСТВЕ

**Александр Александрович Ахматов  
Владимир Иванович Оробинский  
Владимир Павлович Шацкий  
Вячеслав Николаевич Солнцев**

Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Одним из направлений повышения производительности зерноочистительных машин и повышения качества очистки является совершенствование процесса подачи зерна на решета зерноочистительной машины. Наряду с равномерностью подачи зернового материала по ширине решетного стана важным является исключение его повреждения. Последнему требованию в большей степени отвечают питающие устройства гравитационного действия. Процесс истечения сыпучего материала из бункеров сложен и до сих пор полностью не изучен. Целью исследований является изучение взаимодействия частиц зернового вороха в бункере питающего устройства зерноочистительной машины. Объект исследований – зерновой ворох, поступающий на послеуборочную обработку в технологическую линию зерноочистительного агрегата. Производительность зерноочистительной машины и качество очистки решет зависят от конструктивно-технологических параметров питающего устройства, физико-механических свойств подаваемого вороха и его компонентов в момент обработки. Рассмотрены силы, действующие на элемент зернового вороха. Процесс истечения сыпучих смесей из питающего устройства моделировался с использованием обыкновенных дифференциальных уравнений и последующих математических вычислений. Установлена зависимость изменения давления на зерновки в бункере приемно-распределительного устройства зерноочистительной машины по высоте слоя зернового вороха. Выявлено, что при большей высоте вороха в бункере давление в слое нарастает более интенсивно, чем при малой высоте. При этом в нижних слоях зернового вороха происходит выравнивание давлений, что способствует равномерному истечению материала через дозирующую щель приемно-распределительного устройства по всей ширине решетного стана зерноочистительной машины. Исследованиями установлено, что лучшее распределение зернового вороха по ширине решетного стана зерноочистительной машины наблюдается при высоте его в бункере не менее 0,6 м. Для поддержания требуемой высоты слоя зернового вороха в питающем устройстве необходимо разработать и установить систему автоматического контроля.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** зерноочистительная машина, сыпучий материал, зерновой ворох, бункер, боковое давление, высота слоя, силы тяжести.

## ON THE JUSTIFICATION OF GRAIN MIXTURES OUTFLOW IN THE FEEDING DEVICE

**Alexandr A. Akhmatov  
Vladimir I. Orobinsky  
Vladimir P. Shatsky  
Vyacheslav N. Solntsev**

Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

One of the directions of increasing the productivity of grain cleaning machines and improving the quality of cleaning is the improvement of the process of supplying the grain to the sieves of grain cleaning machines. Alongside with the uniformity of supplying the grain material throughout the width of the sieve pan it is important to exclude its damage. The latter requirement is met to a greater extent by feeding devices of gravitational action. The process of outflow of bulk material from the bunkers is complex and still understudied. The objective of research was to study the interactions of grain particles in the bunker of the feeding device of the grain cleaning machine. The object of research was the thrashed grain heap supplied for post-harvest processing on the technological line of the grain cleaning unit. The productivity of the grain cleaning machine and the quality of cleaning of sieves depend on the constructive and technological parameters of the feeding device and physicommechanical properties of the supplied thrashed heap and its components at the time of processing. The authors have considered the forces acting on the element of grain heap.

The process of outflow of bulk mixtures from the feeding device was simulated using the ordinary differential equations and subsequent mathematical calculations. The authors have also established the dependence of changes in pressure on kernels in the bunker of the reception and distributing device of the grain cleaning machine on the height of grain heap layer. It was revealed that greater height of grain heap in the bunker produces a more intensively increasing pressure in the layer than at smaller heights. At the same time in the lower layers of grain heap the pressures are equalizing, which contributes to an even outflow of the material through the dispensing gap of the reception and distributing device throughout the whole width of the sieve pan of the grain cleaning machine. It was established that the best distribution of grain heap throughout the width of the sieve pan of the grain cleaning machine is achieved when its height in the bunker is not less than 0.6 m. In order to maintain the required height of grain heap in the feeding device it is necessary to develop and install a system of automatic control.

KEY WORDS: grain cleaning machine, bulk material, grain heap, bunker, side pressure, layer height, gravity forces.

### **В**ведение

Одним из направлений повышения производительности зерноочистительных машин и повышения качества очистки зерна является совершенствование процесса подачи зерна на решета зерноочистительной машины [8]. Равномерность загрузки решетчатого стана по ширине зависит от конструкции питающего устройства. Наряду с равномерностью подачи зернового материала по ширине важным является исключение его повреждения. Последнему требованию в большей степени отвечают питающие устройства гравитационного действия. Процесс истечения сыпучего материала из бункеров сложен и до сих пор полностью не изучен. Истечение сыпучего материала зависит от физико-механических свойств зерна, состояния поверхности частиц и стенок бункера, геометрических размеров, формы бункера, отверстия истечения и др. В работе бункера различают следующие этапы: заполнение; начало истечения (соответствует переходному периоду); установившееся истечение при постоянном и переменном уровне; выгрузка [5, 7, 9, 12].

Сыпучий материал представляет собой совокупность воздуха и частиц твердого тела. Связь между частицами, ориентация их в пространстве определяются силами трения и тяжести. Сыпучие материалы по своим свойствам занимают промежуточное положение между твердыми и жидкими телами и при помещении в желоб принимают его форму, а при наклоне желоба текут, как и жидкие [11, 13].

Целью исследований является изучение взаимодействия частиц зернового вороха в бункере питающего устройства зерноочистительной машины. Объект исследований – зерновой ворох, поступающий на послеуборочную обработку в технологическую линию зерноочистительного агрегата.

### **Методика исследований**

При рассмотрении процесса истечения сыпучих смесей из питающего устройства зерноочистительной машины использовались методы классической механики и гидравлики, моделировался процесс с применением дифференциальных уравнений и последующих математических вычислений. При изучении данной проблемы за основу взяты многочисленные разработки известных ученых [1, 2, 4, 5, 6, 14].

### **Результаты и их обсуждение**

Равномерность истечения сыпучего материала через отверстие питающего устройства в значительной степени зависит от сил, действующих на ворох в зоне его истечения.

Рассмотрим зерновой ворох, находящийся в бункере приемно-распределительного устройства высотой  $\Delta z$ , длиной  $b$  и шириной  $h$ . На элемент зерновой массы действуют следующие силы: сила тяжести  $F_1$ ; сила, обусловленная давлением  $F_2$ ,  $F_3$ ; сила трения (рис. 1).

Сила тяжести, действующая на элемент зернового вороха, равна

$$F_1 = m \cdot g, \quad (1)$$

где  $m$  – масса элемента зернового вороха;

$g$  – ускорение свободного падения.

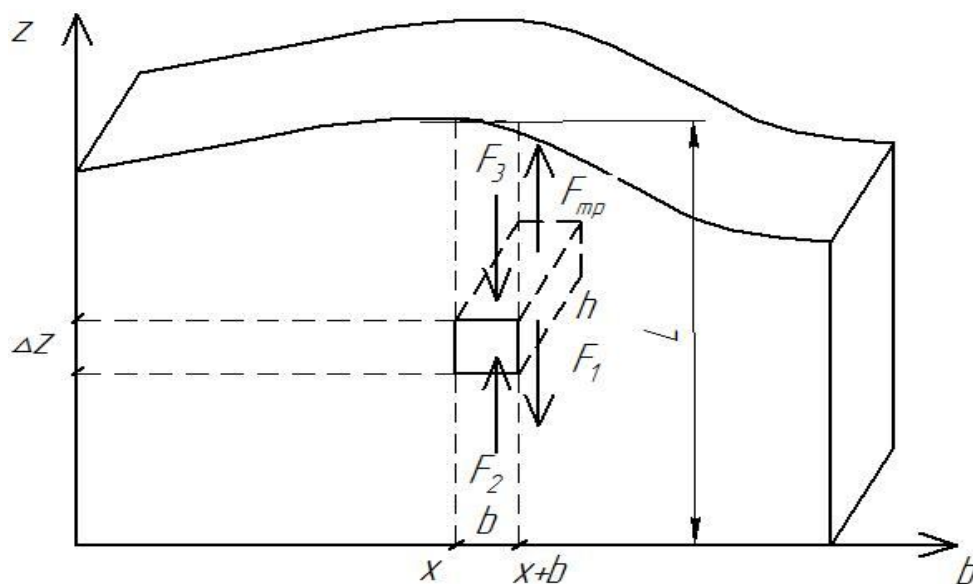


Рис. 1. Схема сил, действующих на элемент зернового вороха, находящийся в приемно-распределительном устройстве

Масса элемента зернового вороха определяется по формуле

$$m = \rho \cdot \Delta V,$$

где  $\rho$  – плотность материала;

$\Delta V$  – объем элемента зернового вороха, который, в свою очередь, определяется из соотношения

$$\Delta V = b \cdot \Delta z \cdot h.$$

Таким образом

$$m = \rho \cdot b \cdot \Delta z \cdot h. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в выражение (1), получим

$$F_1 = \rho \cdot b \cdot \Delta z \cdot h \cdot g. \quad (3)$$

Сила трения определяется по формуле

$$F_{тр} = k \cdot N, \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент внутреннего трения;

$N$  – нормальная реакция.

$$N = P_{бок} \cdot S,$$

где  $P_{бок}$  – боковое давление элемента зернового вороха;

$S$  – площадь боковой поверхности, которая равна

$$S = \Delta z \cdot h.$$

Боковое давление элемента зернового вороха ( $P_{бок}$ ) определим как среднее арифметическое боковых давлений на верхнюю и нижнюю части выделенного элемента (рис. 2)

$$P_{бок} = \frac{P_{бок}(z) + P_{бок}(z + \Delta z)}{2},$$

где  $P_{бок}(z)$  – боковое давление в точке  $z$ ;

$P_{бок}(z + \Delta z)$  – боковое давление в точке  $(z + \Delta z)$ .

При  $z \rightarrow 0$  боковое давление будет равно

$$P_{бок} = P_{бок}(z).$$

После некоторых преобразований и с учетом того, что боковое давление действует с двух сторон, выражение (4) будет выглядеть следующим образом:

$$F_{тр} = k \cdot P_{бок}(z) \cdot 2 \cdot \Delta z \cdot h. \quad (5)$$

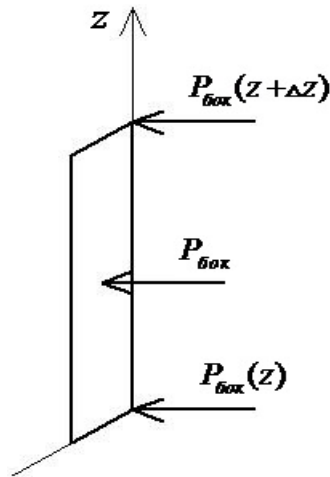


Рис. 2. Действие бокового давления в приемно-распределительном устройстве на элемент зернового вороха

Кроме силы тяжести и бокового давления на зерновки действуют силы, которые обусловлены давлением ( $F_2, F_3$ ) и определяются из следующих выражений:

$$F_2 = P(z) \cdot b \cdot h, \quad (6)$$

$$F_3 = P(z + \Delta z) \cdot b \cdot h, \quad (7)$$

где  $P(z)$  – вертикальное давление в точке  $z$ ,

$P(z + \Delta z)$  – вертикальное давление в точке  $(z + \Delta z)$ .

После определения всех сил, действующих на зерновой ворох, составляем уравнение равновесия

$$F_{тр} + F_2 - F_1 - F_3 = 0.$$

С учетом выражений (3), (5), (6), (7) уравнение равновесия примет вид

$$kP_{бок}(z)2 \Delta zh + P(z)bh - \rho b \Delta zhg - P(z + \Delta z)bh = 0. \quad (8)$$

Боковое давление в точке  $z$  можно представить в виде выражения

$$P_{бок}(z) = \zeta \cdot P(z), \quad (9)$$

где  $\zeta$  – коэффициент бокового давления сыпучего материала [9], определяемый по формуле

$$\zeta = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} = \operatorname{tg}^2\left(\frac{\varphi}{2} + \frac{\pi}{4}\right),$$

где  $\varphi$  – внутренний угол трения.

Коэффициент бокового давления сыпучего материала для зерна равен примерно 0,44.

Как известно, внутренний угол трения характеризуется углом естественного откоса, величина которого во многом зависит от влажности зерна. Для семян зерновых культур  $\varphi = 0,4 \dots 0,6$ .

Запишем уравнение (8) с учетом выражения (9)

$$P(z + \Delta z) \cdot b - P(z) \cdot b - 2 \cdot k \cdot \zeta \cdot P(z) \cdot \Delta z = -\rho \cdot b \cdot \Delta z \cdot g. \quad (10)$$

Разделив уравнение (10) на  $b\Delta z$ , получим

$$\frac{P(z + \Delta z) - P(z)}{\Delta z} - \frac{2 \cdot k \cdot \zeta \cdot P(z)}{b} = -\rho g. \quad (11)$$

Рассмотрим уравнение (11) при  $\Delta z \rightarrow 0$ , получим линейное дифференциальное уравнение 1-го порядка относительно вертикального давления  $P(z)$

$$\frac{dP}{dz} - \frac{2 \cdot k \cdot \zeta \cdot P(z)}{b} = -\rho g. \quad (12)$$

Добавим к этому уравнению граничное условие

$$P(L) = 0, \quad (13)$$

где  $L$  – средняя высота столба зернового вороха на участке  $[x; x+b]$  (см. рис. 1).

Уравнение (13) означает, что на верхней границе столба давление равно нулю.

Для решения дифференциального уравнения представим боковое давление в виде произведения

$$P(z) = u(z) \cdot v(z), \quad (14)$$

где  $u(z)$ ,  $v(z)$  – неизвестные функции, причем функция  $v(z)$  может быть выбрана произвольно [3]. Тогда

$$\frac{dP}{dz} = \frac{du}{dz} \cdot v(z) + u(z) \cdot \frac{dv}{dz}.$$

С учетом предыдущих выражений уравнение (12) примет вид

$$\frac{du}{dz} \cdot v(z) + u(z) \cdot \frac{dv}{dz} - \frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} u(z)v(z) = -\rho g.$$

Упростим это уравнение и получим

$$\frac{du}{dz} \cdot v(z) + u(z) \left[ \frac{dv}{dz} - \frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} v(z) \right] = -\rho g. \quad (15)$$

Так как  $v(z)$  может быть любой функцией, мы обращаем квадратную скобку в уравнении (15) в ноль, т.е.

$$\frac{dv}{dz} = \frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} v.$$

После разделения переменных проинтегрируем это уравнение

$$\int \frac{dv}{v} = \int \frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} dz$$

и в результате получим

$$\ln v = \frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z.$$

Из предыдущего выражения определяем  $v$

$$v = e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z}. \quad (16)$$

Решаем оставшуюся часть уравнения (14)

$$\frac{du}{dz} \cdot v(z) = -\rho g. \quad (17)$$

Подставив выражение (16) в уравнение (17), будем иметь

$$\begin{aligned} \frac{du}{dz} \cdot e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z} &= -\rho g, \\ \frac{du}{dz} &= -\rho g \cdot e^{-\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z}. \end{aligned}$$

Проинтегрируем это уравнение, получаем

$$u = \int -\rho g e^{-\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z} dz = \rho g \frac{b}{2 \cdot k \cdot \zeta} \cdot e^{-\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z} + C, \quad (18)$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Подставляя выражение (16) и (18) в выражение (14), после преобразований получим

$$P(z) = uv = C \cdot e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z} + \frac{\rho g b}{2 k \zeta}. \quad (19)$$

Используя граничное условие (12), определим постоянную интегрирования

$$0 = C \cdot e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} L} + \frac{\rho g b}{2 k \zeta},$$

откуда  $C$  будет равна

$$C = -\frac{\rho g b}{2 k \zeta} e^{-\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} L}.$$

Подставляя постоянную интегрирования в выражение (19), получаем

$$P(z) = -\frac{\rho g b}{2 k \zeta} e^{-\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} L} \cdot e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} z} + \frac{\rho g b}{2 k \zeta}.$$

Окончательно выражение после всех преобразований примет вид

$$P(z) = \frac{\rho g b}{2 k \zeta} \left( 1 - e^{\frac{2 \cdot k \cdot \zeta}{b} (z-L)} \right). \quad (20)$$

Полученное выражение позволяет определить давление, действующее на элемент зернового вороха в вертикальном столбе при разной высоте слоя. Подставив в полученное уравнение исходные данные, определим численные значения давления в слое. Графические зависимости давления на элемент зерновой массы в слое при различной высоте вороха в бункере представлены на рисунке 3.

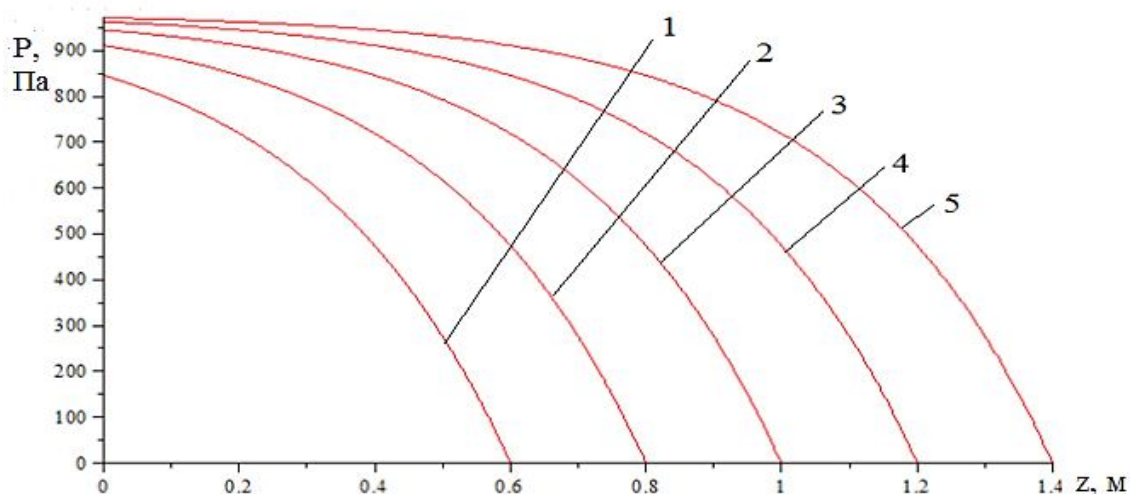


Рис. 3. Изменение давления на зерновки в бункере приемно-распределительного устройства в зависимости от высоты слоя зернового вороха:  
 $P$  – давление, Па;  $z$  – высота слоя зернового вороха, м;  
 1 – высота вороха 0,6 м; 2 – 0,8 м; 3 – 1 м; 4 – 1,2 м; 5 – 1,4 м

Результаты расчетов показывают, что на вершине вороха давление, действующее на зерновки, равно нулю и возрастает к нижним слоям. При большей высоте вороха в бункере давление в слое нарастает более интенсивно, чем при малой высоте. Так, для высоты вороха 1,4 м наиболее интенсивно давление изменяется в верхних слоях и, начиная со слоя приблизительно 0,8 м, изменяется незначительно, т.е. практически стабилизируется. Это можно объяснить изменением действия внутренних сил и прежде всего сил  $F_2$  и  $F_3$  (см. рис. 1).

Для высот вороха 1,2; 1,0 и 0,8 м стабилизация давления наступает в более низких слоях. Так, при высоте вороха 1,2 м давление практически стабилизируется в слое 0,6 м, а при высоте 0,8 только в слое 0,2 м.

При высоте вороха в бункере 0,6 м и менее стабилизация давления в слое не наступает, поэтому высоту вороха 0,6 м можно считать минимальной для равномерного истечения материала через дозирующую щель питающе-распределительного устройства.

### Заклучение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для равномерного распределения материала через дозирующую щель по ее длине, т.е. по ширине решетчатого стана зерноочистительной машины, необходимо в бункере поддерживать определенную высоту вороха, которая не должна быть менее 0,6 м. Такое условие можно соблюсти только за счет согласования производительности подающей норрии и зерноочистительной машины. Для этого необходимо на зерноочистительной машине предусмотреть систему автоматического поддержания заданной высоты слоя.

### Библиографический список

1. Андреева Е.В. Влияние некоторых сводообразующих факторов на истечение зерновых материалов из бункеров / Е.В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2004. – № 4. – С. 73-75.
2. Богомягих В.А. Влияние влажности зерновых материалов на их истечение из бункера наибольшего расхода / В.А. Богомягих, А.А. Скудина // Молодой ученый. – 2015. – № 14. – С. 131-133.
3. Высшая математика. Краткий курс : учеб. пособие / П.В. Москалев, В.П. Богатова, И.В. Гриднева; под ред. проф. Шацкого В.П. – Воронеж : ВГАУ, 2009. – 240 с.

4. Косилов Н.И. Повышение эффективности предварительной очистки за счет расслоения потока зернового вороха / Н.И. Косилов, А.С. Маликов, В.В. Романов // Повышение производительности и качества работы зерноуборочных и зерноочистительных машин : сб. науч. тр. Челябинск. ин-та механизации и электрификации сел. хоз-ва. – Челябинск, 1986. – С. 5-13.
5. Кунаков В.С. Распределение давлений в бункере с вертикальными стенками, наклонным дном и боковым выпускным отверстием / В.С. Кунаков, К.А. Тимолянов // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 9-й междунар. науч.-практ. конф. в рамках 19-й международной агропромышленной выставки «ИнтерАгроМаш - 2016». – Ростов-на-Дону, 2016. – С. 86-88.
6. Кунаков В.С. Скорость истечения влажного зернового материала из пирамидных бункеров / В.С. Кунаков, В.А. Тызыхян, А.А. Тызыхян // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2010. – № 7. – С. 48.
7. Кунаков В.С. Скорость истечения зерновых материалов из бункера с боковым выпускным отверстием / В.С. Кунаков, Д.Н. Савенков, В.В. Испанов // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 2. – С. 73-75.
8. Механизация растениеводства / В.Н. Солнцев, А.П. Тарасенко, В.И. Оробинский, О.И. Поливаев, А.В. Ворохобин, А.П. Дьячков; под ред. канд. техн. наук В.Н. Солнцева. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 383 с.
9. Пат. № 148656, МПК В 07 В11/06 (2006.01). Приемно-распределительное устройство зерноочистительной машины / Оробинский В.И., Солнцев В.Н., Ахматов А.А.: заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – № 2014128445/03; заявл. 10.07.2014; опубл. 10.12.2014, Бюл. № 34. – 2 с.
10. СНиП 2.10.05-85. Строительные нормы и правила. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна. Госстрой СССР – Москва : ЦИТП, 1985. – 32 с.
11. Федоренко В.Ф. Зерноочистка – состояние и перспективы / В.Ф. Федоренко, Е.Л. Ревякин. – Москва : Росинформагротех, 2006. – 204 с.
12. Чижииков А.Г. Основные направления развития технологии и технических средств сушки зерна и семян / А.Г. Чижииков // Сб. науч. тр. ВИМ. – Москва, 2000. – Т. 132. – С. 79-90.
13. Чумаков В.Г. Совершенствование технологии и технических средств для послеуборочной обработки зерна на основе дифференцирования потоков зернового вороха : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.20.01 / В.Г. Чумаков. – Челябинск, 2012. – 345 с.
14. Шатохин И.В. Оценка дробления зерна различных культур нориями / И.В. Шатохин, А.Г. Парфенов // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 1 (17). – С. 244-249.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Александр Александрович Ахматов – аспирант кафедры сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-78-61, E-mail: sanja1504@yandex.ru.

Владимир Иванович Оробинский – доктор сельскохозяйственных наук, профессор, зав. кафедрой сельскохозяйственных машин, декан агроинженерного факультета, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 224-39-39, E-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Владимир Павлович Шацкий – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой высшей математики и физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-70-03, E-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Вячеслав Николаевич Солнцев – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Российская Федерация, г. Воронеж, тел. 8(473) 253-78-61, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 03.11.2016

Дата принятия к печати 27.11.2016

### AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Alexandr A. Akhmatov – Post-graduate Student, the Dept. of Agricultural Machinery, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-78-61, E-mail: sanja1504@yandex.ru.

Vladimir I. Orobinsky – Doctor of Agricultural Sciences, Professor, Head of the Dept. of Agricultural Machinery, Dean of the Faculty of Rural Engineering, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8(473) 224-39-39, E-mail: main@agroeng.vsau.ru.

Vladimir P. Shatsky – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Higher Mathematics and Physics, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-70-03, E-mail: mathem@agroeng.vsau.ru.

Vyacheslav N. Solntsev – Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russian Federation, Voronezh, tel. 8 (473) 253-78-61, E-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Date of receipt 03.11.2016

Date of admittance 27.11.2016