

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ПАДЕНИЯ СФЕРИЧЕСКОЙ ЗЕРНОВКИ В РАСТВОР ПРОТРАВЛИТЕЛЯ

Сысуев В.А., Сайтов В.Е., Фарафонов В.Г., Сайтов А.В., Малых Т.В.

**Реферат.** Продукты питания, приготовленные из зерна, – основной источник питания человека и корма для сельскохозяйственных животных. Один из главных резервов повышения его производства – посев высококачественным материалом, очищенным от различных примесей и болезнетворных микроорганизмов. Для его защиты от различных заболеваний применяют протравливание. К наиболее эффективным способам реализации этой технологической операции относится мокрое протравливание с одновременным выделением зерновой примеси. Для разработки соответствующего устройства проведена оценка минимальной высоты падения зерновки, необходимой для преодоления поверхностного натяжения жидкости. В качестве объектов исследований использовали семена гороха, имеющие форму, близкую к сфере. Поэтому за модель семени была принята сферическая зерновка плотностью  $\rho_z = (1,15...1,45) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, диаметром  $2r_z = (3,5...10,9) \cdot 10^{-3}$  м. Исследовали падение отдельно взятых сферических зерновок с минимальными ( $2r_{z\min} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м), средними ( $2r_{z\text{mid}} = 7,2 \cdot 10^{-3}$  м) и максимальными ( $2r_{z\max} = 10,9 \cdot 10^{-3}$  м) линейными размерами, имеющих плотность  $\rho_z = 1,15; 1,25; 1,35$  и  $1,45 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, на поверхность водного раствора протравливателя плотностью  $\rho_{\text{жс}} = 1,00; 1,03; 1,06; 1,09; 1,12$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> с соответствующими коэффициентами поверхностного натяжения  $\sigma = 0,0727; 0,0755; 0,0771; 0,0786; 0,0801$  и  $0,0816$  Н/м и коэффициентами гидродинамического сопротивления  $c = 0,4$  ( $0,5$  для  $\rho_{\text{жс}} = 1,12$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Процесс протравливания рассматривали при температуре 20 °С. Минимальная высота  $h$  падения для преодоления поверхностного натяжения раствора протравливателя всеми зерновками, имеющими физико-механические параметры с указанными значениями, должна составлять  $15,5 \cdot 10^{-3}$  м.

**Ключевые слова:** зерновой материал, зерноочистительная машина, сила Архимеда, поверхностное натяжение, сферическая зерновка.

**Введение.** Основное сырье для производства наиболее важных продуктов питания людей и кормов для животных – зерно сельскохозяйственных культур. Поэтому увеличение его валовых сборов – важнейшая из задач, стоящих перед агропромышленным комплексом Российской Федерации. Один из главных резервов повышения производства зерна – использование высококачественного посевного материала, очищенного от различных примесей и болезнетворных микроорганизмов [1, 2].

Поэтому одна из основных задач – качественная подготовка семенного материала. Однако семена, доведенные до посевных кондиций, могут иметь, как внутреннюю, так и внешнюю инфекцию. Посев зараженных семян приводит к передаче болезней вегетирующим растениям, что создает и поддерживает очаги инфекции в поле. Особенно высокие требования к качеству подготовки семян и проведению посева предъявляют современные ресурсосберегающие технологии. Минимизация обработки почвы способствует накоплению и выживанию в верхнем слое почвы и на растительных остатках фитопатогенов и фитофагов, усложняющих прохождение растениями наиболее уязвимого периода от прорастания семян до формирования полных всходов. Поэтому обработка семян защитными и стимулирующими препаратами – обязательное мероприятие интенсивной технологии в растениеводстве [3, 4, 5].

Один из основных способов защиты семенного материала от таких заболеваний, как корневые гнили, септориоз, снежная плесень, головня и склеротиниоз, – протравливание. Одновременно с использованием протравителей

широкого спектра действия для обработки семян зерновых рекомендуется применять регуляторы роста и микроэлементы, которые в соответствующих дозах для определенных сельскохозяйственных культур стимулируют развитие растений и повышают их производительность [6, 7, 8].

Протравливание семян осуществляют сухим, полусухим и мокрым способами. Самый простой из них – сухое протравливание, которое имеет ряд следующих недостатков: препарат неравномерно распределяется на семенах и плохо на них удерживается, в местах обработки создается высокая запыленность. К полусухому способу относится протравливание жидкими ядохимикатами, используемыми с низкой нормой расхода препаратов с добавлением воды и без нее. Мокрое протравливание проводят в основном путем полива или намачивания семенного материала разбавленными водными растворами или суспензиями смачивающихся порошков [9, 10, 11].

Сейчас обработку семян чаще всего проводят универсальными машинами-протравливателями: ПСШ-5, ПС-10, ПС-10А, «Мобитокс-супер» и др. Кроме того, они могут быть использованы для обработки семян перед посевом бактериальными препаратами и стимуляторами роста, а также для смешивания семян с микроудобрениями полусухим способом. Эти машины сложны по конструкции, имеют рабочие органы шнекового типа, обуславливающие повышенное травмирование и дробление семенного материала. К тому же их установленная мощность варьирует от 2,5 до 8,0 кВт, что значительно увеличивает удельные затраты энергии при выполнении техно-

логического процесса [12].

При этом даже в хорошо очищенном посевном материале после многократной транспортировки вновь образуется зерновая мелочь [13]. Поэтому в конце транспортировки для исключения попадания запыленного зерна в протравитель необходимо дополнительно очищать посевной материал воздушно-решетной зерноочистительной машиной [14, 15, 16].

Обработку посевного материала химическими протравителями мокрым способом проводят для интегрированной защиты растений. Она позволяет защитить семена и проростки от вредных организмов. Этот способ обеспечивает более глубокое и полное проникновение раствора протравливателя внутрь семян и лучшее обеззараживание их от инфекции. При этом не происходит загрязнения воздуха.

Поэтому разработка не сложной по конструкции машины для протравливания семян мокрым способом [17], имеющей малую энергоемкость технологического процесса, в сравнении с существующими, и включающей функцию удаления зерновой мелочи, – актуальная задача.

Цель исследования – обоснование конструктивно-технологических параметров основных рабочих органов такого устройства, среди которых высота  $h$  расположения загрузочного бункера с семенами относительно поверхности водного раствора протравливателя в его ванне, необходимая для преодоления поверхностного натяжения жидкости.

**Условия, материалы и методы исследований.** В качестве объектов исследований использовали семена гороха, имеющие сферическую форму (сферическая зерновка), плотностью  $\rho_z = (1,15 \dots 1,45) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и диаметром  $2r_z = (3,5 \dots 10,9) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Исследовали падение отдельно взятых сферических зерновок с минимальными ( $2r_{z\text{min}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ), средними ( $2r_{z\text{mid}} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) и максимальными ( $2r_{z\text{max}} = 10,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) линейными размерами, плотностью  $\rho_z = 1,15; 1,25; 1,35$  и  $1,45 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Падение происходит на поверхность воды ( $\rho_{\text{жс}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) и водного раствора протравливателя ( $\rho_{\text{жс}} = 1,03; 1,06; 1,09; 1,12$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) с соответствующими коэффициентами  $\sigma$  поверхностного натяжения (0,0727; 0,0755; 0,0771; 0,0786; 0,0801 и 0,0816 Н/м) и коэффициентами гидродинамического сопротивления  $c = 0,4$  (0,5 для  $\rho_{\text{жс}} = 1,12$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ). Процесс протравливания рассматривали при температуре 20 °С [18].

Силы, влиянием которых можно пренебречь из-за малых их значений, в сравнении с силой тяжести  $m_z g$  сферической зерновки, исключали. Минимальную высоту  $h$  расположения загрузочного бункера, с которой должна поступать шаровая зерновка на поверхность жидкости для преодоления сил поверхностного натяжения, определяли с учетом закона сохранения энергии.

Обработку данных для зерна гороха (сферическая зерновка) при падении в жид-

кость плотностью  $\rho_{\text{жс}} = (1,0 \dots 1,15) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  осуществляли с использованием пакета прикладных программ Microsoft Excel из стандартного набора Microsoft Office 2013.

**Анализ и обсуждение результатов исследований.** Для определения минимальной высоты  $h$  падения сферических зерновок, обеспечивающей преодоления поверхностного натяжения жидкости, нужно учесть плотность  $\rho_z$ , линейные размеры (диаметр  $2r_z$ ) зерновки и физические свойства водного раствора протравливателя ( $\rho_{\text{жс}}, \sigma, c$ ).

Сравним  $\bar{R}$  силу сопротивления воздуха движению зерновки с силой тяжести  $m_z g$  зерновки, при ее начальной скорости  $v_0$  равной нулю при выходе из загрузочного бункера с питателем (рисунок 1) [19]:

$$R = \frac{m_z g v_3^2}{v_{\text{вум}}^2} = \frac{2g}{v_{\text{вум}}^2} \frac{m_z v_3^2}{2} = \frac{2g}{v_{\text{вум}}^2} m_z g h = \frac{2gh}{v_{\text{вум}}^2} m_z g, \quad (1)$$

где  $m_z$  – масса сферической зерновки, кг;  
 $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81$ ), м/с<sup>2</sup>;  
 $v_{\text{вум}}$  – скорость витания сферической зерновки, м/с;  
 $v_3$  – скорость падения сферической зерновки, м/с;  
 $h$  – высота выходного отверстия загрузочного бункера с питателем относительно уровня раствора протравливателя, м.

В предварительных экспериментах было отмечено погружение зерновок в воду при высоте падения  $h = (1,0 \dots 5,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ . Поэтому в расчетах приняли такие значения высоты, а также значения скорости  $v_{\text{вум}} = 7,0 \dots 17,0 \text{ м/с}$

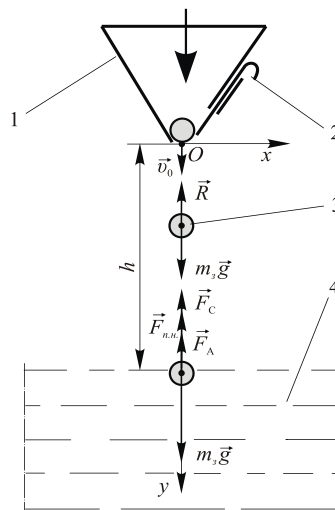


Рисунок 1 – Схема сил, действующих на сферическую зерновку при падении из загрузочного бункера с питателем и поступлении на поверхность раствора протравливателя:

1 – загрузочный бункер с питателем; 2 – регулирующая заслонка; 3 – зерновка; 4 – ванна с раствором протравливателя

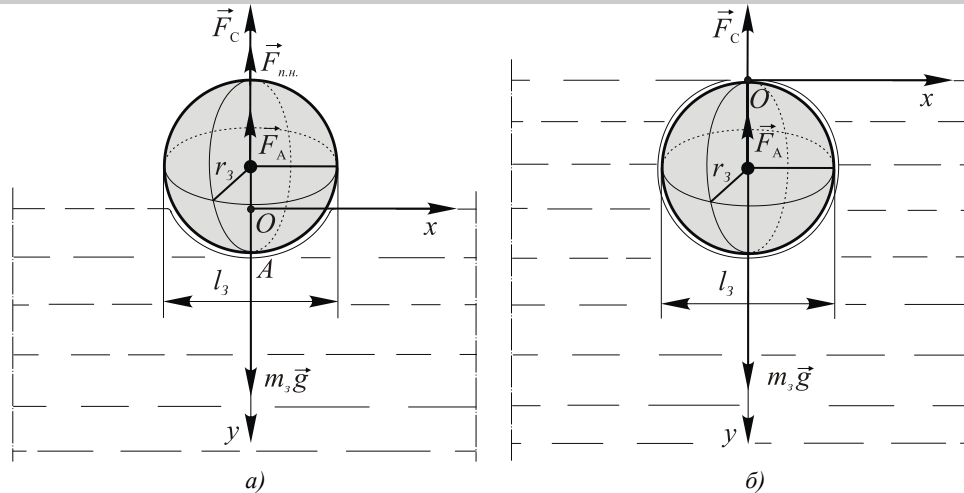


Рисунок 2. Схема сил, действующих на сферическую зерновку при поступлении на поверхность раствора протравливателя: а – при начальном погружении в раствор протравливателя; б – при полном погружении в раствор протравливателя

витания зерна гороха [20].

Сила сопротивления воздуха растет (1) по мере падения от нуля до максимально возможного значения силы  $R$  на поверхности раствора протравливателя, которое будет составлять  $(0,017...2,0) \cdot 10^{-2} m_3 g$ . Это значительно меньше силы  $m_3 g$  тяжести сферической зерновки. Поэтому при оценке высоты  $h$  силу  $R$  сопротивления воздуха принимать во внимание не будем.

Рассмотрим падение сферической зерновки, имеющей диаметр  $2r_3$ , с полным погружением в жидкость и остановкой (см. рисунок 1).

Потенциальная энергия при падении сферической зерновки на поверхность жидкости перейдет в кинетическую энергию. При полном входе в раствор протравливателя зерновки и снижении ее скорости движения до нуля (остановкой) кинетическая энергия будет полностью израсходована на работу против силы  $F_{n.n}$  поверхностного натяжения жидкости, силы  $F_A$  Архимеда и силы  $F_C$  гидродинамического сопротивления, возникающей при турбулентном движении из-за разности давлений перед и за сферической зерновкой [18].

При падении сферической зерновки в раствор протравливателя (рисунок 2а) работу  $A_n$  против сил  $F_{n.n}$  поверхностного натяжения жидкости определяет площадь  $\Delta S$  поверхности сферы [21]:

$$A_{n.n} = \sigma \cdot \Delta S = 4\pi r_3^2 \sigma, \quad (2)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения раствора протравливателя, Н/м;

$\Delta S$  – площадь, на которую увеличилась свободная поверхность раствора протравливателя в результате вхождения в него сферической зерновки,  $m^2$ .

Сила  $F_A(y)$  Архимеда при погружении сферической зерновки в раствор протравливателя на сферический сегмент высотой  $y' = AO$  равна (рисунок 2а):

$$F_A(y') = \Delta m_{ж} g = \pi y'^2 (r_3 - 1/3 y') \rho_{ж} g \quad (3)$$

где  $\Delta m_{ж}$  – масса столбика раствора про-

травливателя высотой  $y'$ , вытесненного частью сферической зерновки, вошедшей в жидкость, кг;

$\rho_{ж}$  – плотность водного раствора протравливателя,  $кг/м^3$ .

Тогда работу  $A_A$  против силы  $F_A$  Архимеда для сферической зерновки в дифференциальной форме можно записать следующим образом:

$$dA_A = F_A(y') dy = \pi y'^2 (r_3 - 1/3 y') \rho_{ж} g dy' \quad (4)$$

Интегрируя выражение (4) в пределах от 0 до  $2r_3$ , получим:

$$\begin{aligned} A_A &= \int_0^{2r_3} dA_A = \pi \rho_{ж} g \int_0^{2r_3} (y')^2 (r_3 - 1/3 y') dy' = \\ &= \frac{4\pi r_3^4 \rho_{ж} g}{3} = \frac{\rho_{ж} r_3}{\rho_3} m_3 g \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\rho_3$  – плотность зерновки,  $кг/м^3$ .

Сила  $F_C$  гидродинамического сопротивления, действующая на сферическую зерновку при ее погружении в водный раствор протравливателя равна [21]:

$$F_C = cS \frac{\rho_{ж}}{2} v_3^2, \quad (6)$$

где  $c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления водного раствора протравливателя при погружении в нем сферической зерновки, зависящий от геометрической формы зерновки, скорости движения и вязкости жидкости;

$S$  – площадь проекции тела (зерновки) на плоскость, перпендикулярную направлению движения зерновки (миделево сечение),  $m^2$ .

При падении шаровой зерновки работа против силы  $F_C$  гидродинамического сопротивления состоит из двух частей. Во время погружения сферической зерновки от момента касания поверхности водного раствора протравливателя до глубины, равной радиусу сферы  $r_3$ , за миделево сечение берем переменную

площадь сечения зерновки на уровне поверхности раствора. Скорость сферической зерновки считаем постоянной, находя завышенное значение  $A_{1C}$  работы:

$$A_{1C} = \int_0^{r_3} F_C dy = c \frac{\rho_{ж}}{2} v_3^2 \int_0^{r_3} S dy = c \frac{\pi \rho_{ж} r_3^2}{2} v_3^2 \int_0^{r_3} \left(1 - \frac{y^2}{r_3^2}\right) dy = \frac{c \rho_{ж}}{2 \rho_3} m_3 gh. \quad (7)$$

При дальнейшем погружении сферической зерновки в водный раствор протравливателя площадь миделевого сечения постоянна и равна  $\pi r_3^2$ , тогда:

$$A_{2C} = F_C r_3 = c S \frac{\rho_{ж}}{2} v_3^2 r_3 = \frac{\pi c b^2 \rho_{ж} v_3^2 r_3}{2} = \frac{3c \rho_{ж}}{4 \rho_3} m_3 gh. \quad (8)$$

Полную работу против силы  $F_C$  гидродинамического сопротивления учтем коэффициентом 0,5 из-за завышенной ее величины, полученной по формулам (7) и (8):

$$A_C = \frac{1}{2} (A_{1C} + A_{2C}) = \frac{c \rho_{ж}}{4 \rho_3} m_3 gh + \frac{3c \rho_{ж}}{8 \rho_3} m_3 gh = \frac{5c \rho_{ж}}{8 \rho_3} m_3 gh. \quad (9)$$

Для полного входа сферической зерновки в водный раствор протравливателя (рисунок 2б) и снижения скорости движения до нуля (остановки) ей нужна потенциальная энергия на выходе из загрузочного бункера:

$$E = m_3 gh + 2 m_3 g r_3, \quad (10)$$

так как при полном входе и остановке центр сферической зерновки проходит расстояние  $h + 2r_3$ .

Уравнение закона сохранения энергии, описывающее падение сферической зерновки и преодоление ею поверхности жидкости, с учетом выражений (2), (5), (9) и (10), будет иметь вид:

$$m_3 g (h + 2r_3) = 4\pi r_3^2 \sigma + \frac{\rho_{ж}}{\rho_3} m_3 g r_3 + \frac{5c \rho_{ж}}{8 \rho_3} m_3 gh. \quad (11)$$

Преобразуя уравнение (11), определим минимальную высоту падения сферической зерновки, необходимую для преодоления поверхностного натяжения жидкости:

$$h = \frac{8}{8\rho_3 - 5c\rho_{ж}} \left[ \frac{3\sigma}{gr_3} + \rho_{ж} r_3 - 2\rho_3 r_3 \right]. \quad (12)$$

Проведем анализ зависимости (12) минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки, необходимой для преодоления поверхностного натяжения жидкости. При увеличении плотности  $\rho_3$  зерновки и неизменных значений остальных параметров ( $r_3$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $c$  и  $\sigma$ ) минимальная высота  $h$  уменьшается, потому что с повышением плотности  $\rho_3$  зерновки увеличатся ее масса и потенциальная энергия.

Такой же анализ свидетельствует, что с

увеличением плотности  $\rho_{ж}$  жидкости при неизменных значениях остальных параметров ( $r_3$ ,  $\rho_3$ ,  $c$  и  $\sigma$ ) минимальная высота  $h$  падения, необходимая для преодоления сферической зерновкой поверхностного натяжения возрастает, потому что в этом случае увеличивается сила  $F_A$  Архимеда и сила  $F_C$  гидродинамического сопротивления (6), а, следовательно, работа против этих сил (5) и (9), необходимая для проникновения зерновки в водный раствор протравливателя. Из закона сохранения энергии нужно увеличить потенциальную энергию зерновки и, значит, увеличить минимальную высоту  $h$ .

При увеличении диаметра  $2r_3$  сферической зерновки и падении в жидкость при неизменных значениях остальных параметров ( $\rho_3$ ,  $\rho_{ж}$ ,  $c$  и  $\sigma$ ) минимальная высота  $h$  уменьшается. Физически это объясняется тем, что вместе с увеличением диаметра  $2r_3$  возрастает объем сферической зерновки. Следовательно, увеличивается масса и потенциальная энергия, завышенное значение которой нужно снизить, уменьшив минимальную высоту  $h$  падения зерновки, необходимую для преодоления поверхностного натяжения жидкости.

Были проведены расчеты по полученной зависимости (12) с применением программы по статистической обработке данных Microsoft Word 2013.

Коэффициент  $c$  гидродинамического сопротивления сферической зерновки зависит от числа Рейнольдса ( $Re$ ), которое зависит от геометрической формы ( $r_3$ ) зерновки, ее скорости  $v_3$ , коэффициента  $\nu$  кинематической вязкости жидкости и находится по формуле [21]:

$$Re = \frac{2r_3 v_3}{\nu}. \quad (13)$$

Значения скоростей сферической зерновки были определены в предварительных опытах в воде и в водном растворе протравливателя  $v_3 = (0,1 \dots 0,4)$  м/с. Коэффициента  $\nu$  кинематической вязкости жидкости взят из литературы [22].

$$\nu = (1,01 \dots 1,30) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Рассчитав, средние значения параметров сферической зерновки (гороха), можно найти число Рейнольдса и по графику, приведенному в работе [23], определить коэффициент  $c$  гидродинамического сопротивления. При поступлении сферической зерновки в жидкость плотностью  $\rho_{ж} = (1,0 \dots 1,09) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  коэффициент  $c$  гидродинамического сопротивления будет равен 0,4, а в водный раствор протравливателя плотностью  $\rho_{ж} = (1,12 \dots 1,15) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 - 0,5$ .

Результаты анализа зависимостей минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки в раствор протравливателя от его плотности  $\rho_{ж}$  и плотности зерна  $\rho_3$  при минимальных ( $2r_{3\text{min}} = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ), средних ( $2r_{3\text{ср}} = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) и максимальных ( $2r_{3\text{max}} = 10,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ) линейных размерах зерновки, построенных по уравнению (12) поверхностей, свидетельствуют, что при минимальных линейных размерах сферической зерновки

ки ( $2r_{\text{min}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м) для преодоления поверхностного натяжения даже воды ( $\rho_{\text{ж}} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) зерновку необходимо поднять над уровнем жидкости (рисунок 3а). Наибольшее значе-

ние минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки, необходимое для преодоления поверхностного натяжения жидкости ( $15,5 \cdot 10^{-3}$  м), потребуется при наименьшей плотности гороха ( $\rho_3 = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и раствора протравливателя  $\rho_{\text{ж}} = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Наименьшим ( $7,8 \cdot 10^{-3}$  м) оно будет при наибольшей плотности гороха ( $\rho_3 = 1,45 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>).

При средних линейных размерах зерновки ( $2r_{\text{mid}} = 7,2 \cdot 10^{-3}$  м) величины минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки, необходимой для преодоления поверхностного натяжения жидкости плотностью  $\rho_{\text{ж}} = (1,0 \dots 1,15) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, принимают положительные значения при плотности зерна  $\rho_3 = (1,15 \dots 1,35) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> (рисунок 3б). Кроме того, они характерны для зерна плотностью  $\rho_3 = 1,45 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> при падении в жидкость плотностью  $\rho_{\text{ж}} = (1,09 \dots 1,15) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Только при падении в жидкость плотностью  $\rho_{\text{ж}} = (1,0 \dots 1,06) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> зерна плотностью  $\rho_3 = 1,45 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> необходимы отрицательные значения величины минимальной высоты  $h$ .

При максимальных линейных размерах ( $2r_{\text{max}} = 10,9 \cdot 10^{-3}$  м) сферические зерновки любой плотности ( $\rho_3 = (1,15 \dots 1,45) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) будут тонуть (рисунок 3в), даже если их положить на поверхность наиболее плотного водного раствора протравливателя ( $\rho_{\text{ж}} = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Это очевидно, так как поверхность, показывающая зависимость минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки от плотностей зерна  $\rho_3$  и жидкости  $\rho_{\text{ж}}$ , находится ниже координатной плоскости ( $h < 0$ ). Отрицательные значения высоты ( $h < 0$ ) означают, что нет необходимости поднимать сферическую зерновку над раствором для преодоления ею поверхностного натяжения жидкости во всем диапазоне рассматриваемых плотностей  $\rho_{\text{ж}} = (1,0 \dots 1,15) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>.

Следовательно, более крупные сферические зерновки любой плотности  $\rho_3$ , будучи даже положенными на поверхность наиболее плотного водного раствора протравливателя ( $\rho_{\text{ж}} = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), будут преодолевать поверхностное натяжение и тонуть. Для того чтобы наиболее мелкие сферические зерновки любой плотности ( $\rho_3 = (1,15 \dots 1,45) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) при падении в даже наименее плотную из рассматриваемых жидкостей (вода) гарантированно преодолели поверхностное натяжение необходимо поднять их на высоту  $h$  не менее 15,5 мм.

Это означает, что с использованием водного раствора протравливателя, специально рассчитанной плотности  $\rho_{\text{ж}}$ , можно разделять сферические зерновки по диаметру  $2r_3$ . Зерновки любой плотности ( $\rho_3 = (1,15 \dots 1,45) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) с диаметром не меньшим ( $\geq$ )  $2r_3$ , чем соответствующий ( $h = 0$ ) данной плотности  $\rho_{\text{ж}}$  жидкости, будут тонуть даже положенными на поверхность жидкости. При этом сферические зерновки любой плотности ( $\rho_3 = (1,15 \dots 1,45) \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) с меньшим диаметром ( $<$ )  $2r_3$ , будучи размещенными на поверхности водного

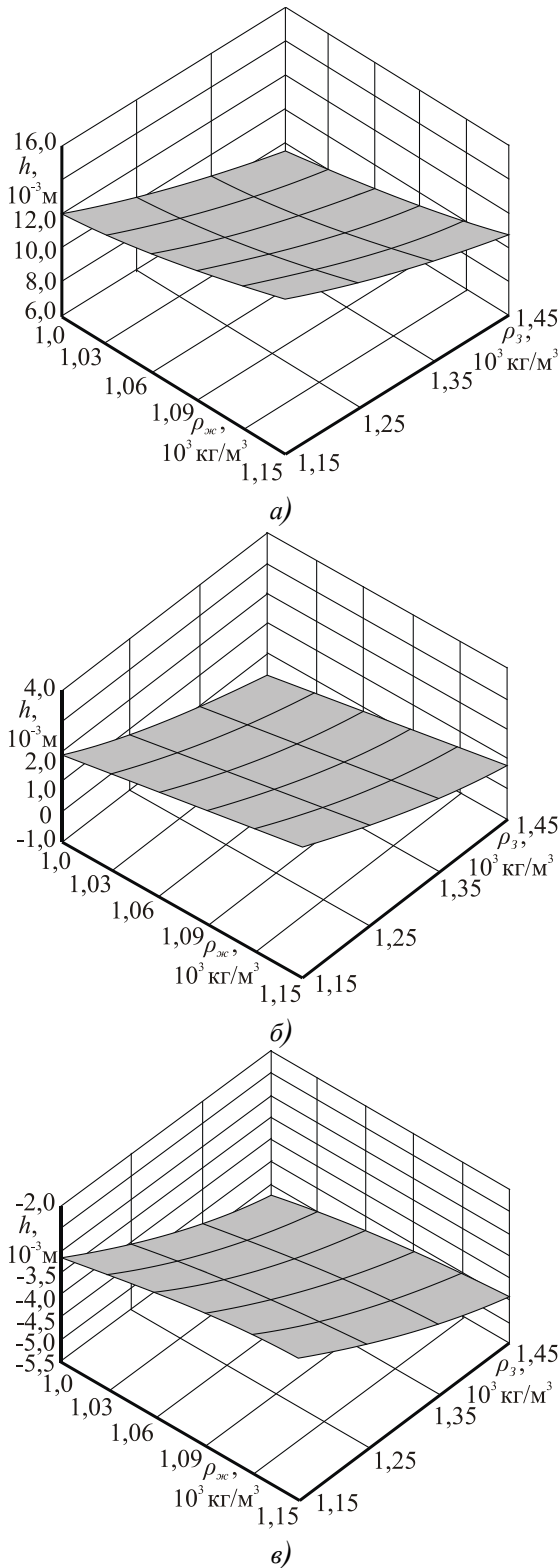


Рисунок 3 – Зависимости минимальной высоты  $h$  падения сферической зерновки в раствор протравливателя от его плотности  $\rho_{\text{ж}}$  и плотности зерна  $\rho_3$  при минимальных  $2r_{\text{min}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$  м (а), средних  $2r_{\text{mid}} = 7,2 \cdot 10^{-3}$  м (б) и максимальных  $2r_{\text{max}} = 10,9 \cdot 10^{-3}$  м (в) линейных размерах зерновки



раствора протравливателя, специально рассчитанной плотности  $\rho_{жс}$ , будут гарантированно оставаться на его поверхности.

Аналогично, с помощью специально подобранного водного раствора протравливателя, специально рассчитанной плотности  $\rho_{жс}$ , можно разделять по плотности  $\rho_3$  сферические зерновки. Для этого нужно поместить на поверхность водного раствора, заранее отобранные зерна гороха (проще предварительно разделенные по диаметру) нужного диаметра  $2r_3$ . Плотность  $\rho_ж$  водного раствора определяется из уравнения (12) для выбранных значений диаметра  $2r_3$  и плотности  $\rho_3$  сферической зерновки (гороха), при которых минимальная высота  $h$  падения, необходимая для преодоления поверхностного натяжения равна нулю ( $h=0$ ). Сферические зерновки плотностью  $\rho_3$  не меньшей ( $\geq$ ) заданной и данного диаметра  $2r_3$ , будут тонуть даже положенными на поверхность этого раствора. А при меньшей плотности  $\rho_3$  – гарантированно находиться на поверхности жидкости и могут быть удалены.

Представленные расчеты можно рассматривать как новый подход (метод) разделения семян гороха по плотности  $\rho_3$  и линейным размерам ( $2r_3$ ) не только в селекции и семеноводстве, но и перед подготовкой гороха для тор-

говых целей.

**Выводы.** Таким образом, при падении сферической зерновки в водный раствор протравливателя минимальная высота  $h$  расположения выходного отверстия загрузочного бункера зависит от плотности  $\rho_3$  и диаметра  $2r_3$  зерновки, а также плотности жидкости  $\rho_ж$ . Теоретическую формулу (12) можно использовать при разработке машины мокрой очистки от примесей и протравливания семян, имеющих форму, близкую к сферической.

**Сведения об источнике финансирования.** Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (тема № 0767-2019-0094) «Создание инновационных технологий и технологий нового поколения для механизации растениеводства и животноводства, адаптированных к климатическим условиям северо-востока европейской части России» и по научной теме «Физико-математическое моделирование разделения зерновых материалов» кафедры математики и физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Киров, Россия).

#### Литература

1. Improving the mechanization of high-quality seed production / V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, A.M. Gievsky, et al. / *Advances in Engineering Research*. 2018. P. 849-852. DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>
2. Seed refinement in the harvesting and post-harvesting process / V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, I.V. Baskakov, et al // *Advances in Engineering Research*. 2018. P. 870-874.
3. Щеклеина Л.М., Шешегова Т.К. Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): история и современность (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. 2013. № 1. С. 5-12.
4. Шешегова Т.К., Щеклеина Л.М., Уткина Е.И. Иммунологическая характеристика сортов озимой ржи // *Аграрная наука Евро-Северо-Восток*. 2018. № 4 (65). С. 30-35. DOI: <https://doi.org/10.30766 / 2072-9081.2018.65.4.30-35>.
5. Щеклеина Л.М., Шешегова Т.К. Спорынья вредна для новых сортов озимой ржи в Кировской области // *Вестник Марийского государственного университета*. Вестник Марийского государственного университета. 2018. №2 (14). С. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.30914 / 2411-9687-2018-4-2-83-89>
6. Устойчивость сортов ржи к спорыньи и содержанию алкалоидов спорыньи у *sclerotia claviceps purpurea* в условиях Кировской области / Т.К. Шешегова, Л.М. Щеклеина, В.П. Желифонова и др. // *Микология и фитопатология*. 2019. №3. С. 177-182. DOI: <https://doi.org/10.1134 / S0026364819030127>
7. Источники устойчивости ярового ячменя к гельминтоспористым болезням и их использование в селекции / Т.К. Шешегова, И.Н. Щенникова, Л.М. Щеклеина и др. // *Аграрная наука Евро-Северо-Восток*. 2016. № 5. С. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2016.54.5.09-14>
8. Фузариозные корневые гнили зерновых культур в Западной Сибири и Зауралье / Е.Ю. Торопова, О.А. Казакова, И.Г. Воробьева и др. // *Защита и карантин растений*. 2013. №9. С. 23-26.
9. Абеленцев В.И. Возможности современных протравителей семян зерновых колосовых культур // *Защита и карантин растений*. 2011. № 2. С. 19-22.
10. Порсев И.Н., Торопова Е.Ю., Малинников А.А. Эффективность протравителей семян в ограничении корневых гнилей яровой пшеницы // *Защита и карантин растений*. 2016. № 2. С. 24-26.
11. Тимофеев В.Н., Гарбар Л.И. Особенности влияния протравителей и их смесей на патогенную микрофлору семян // *Проблемы микологии и фитопатологии в XXI веке: Материалы междунар. науч. конф., посвящ. 150-летию со дня рожд. чл.-корр. АН СССР, проф. А.А. Ячевского*. СПб: ООО «Копи-Р Групп», 2013. С. 262-264.
12. Гришкин Д.С. Справочник агронома по вопросам протравливания семян зерновых культур. М.: Вауер СтрScience, 2006. 42 с.
13. Исследование прочностных и посевных качеств семян озимой пшеницы по фракционной технологии послеуборочной обработки зерна / В.И. Оробинский, А.М. Гиевский, А.П. Тарасенко и др. // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. 2019. Том. 12. № 62 (3). С. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.3.13>
14. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.M. Gievsky, V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, et al. // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>.
15. Andreev V.L. Calculation of the effective separation of light impurities in the inertial jalousie-counter-current dust collector. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop «Advanced Tech-*

nologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering». 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032097>

16. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a grain cleaning machine for small farms, AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2011. №4. P. 37-40.

17. Пат. 2710715 Российская Федерация, МПК В02В 1/04. Машина для отделения спорыньи от семян ржи / В.А. Сысуев, А.В. Сайтов, В.Г. Фарафонов и др.; заявитель Федеральное государственное научное учреждение «Федеральный аграрный научный центр имени Н.В. Рудницкого». № 2019114802; заявл. 14.05.2019, опубл. 10.01.2020, Бюл. № 1.

18. Theoretical background of calculating of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia / V.A. Sysuev, V.E. Saitov, V.G. Farafonov, et al// Russian Agricultural Sciences. 2017. №3. P. 273-276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>.

19. Малис А.Я., Демидов А.Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.

20. Бурков А.И., Сычугов Н.П. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2000. 261 с.

21. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: Гидродинамика / 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. Т. 4. 736 с.

22. Чубик И.А., Маслов А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность, 1970. 184 с.

23. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 365 с.

#### Сведения об авторах:

Сысуев Василий Алексеевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, научный руководитель, e-mail: [priemnaaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaaya@fanc-sv.ru)

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого», г. Киров, Россия

Сайтов Виктор Ефимович — доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка, e-mail: [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru);

ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого», г. Киров, Россия

ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», г. Киров, Россия

Фарафонов Вячеслав Георгиевич – кандидат физико-математических наук, заведующий кафедрой математики и физики, e-mail: [farwg@mail.ru](mailto:farwg@mail.ru);

Сайтов Алексей Викторович – магистрант, e-mail: [alexseysaitov@yandex.ru](mailto:alexseysaitov@yandex.ru).

Малых Татьяна Викторовна – старший преподаватель кафедры математики и физики, e-mail: [tvmalых@yandex.ru](mailto:tvmalых@yandex.ru)

ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», г. Киров, Россия

### THEORETICAL JUSTIFICATION OF THE MINIMUM DROP HEIGHT OF A SPHERICAL GRAIN INTO THE DEVELOPER SOLUTION

Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V., Malykh T.V.

**Abstract.** Food products made of grain are the main source of human nutrition and feed for farm animals. One of the main reserves for increasing its production is sowing with high-quality material, purified from various impurities and pathogens. To protect it from various diseases, etching is used. The most effective way to implement this technological operation is wet pickling with simultaneous release of grain impurities. For implementation of a corresponding device, an estimate was made of the minimum drop height of a weevil which is necessary to overcome the surface tension of a liquid. Pea seeds with a shape close to a sphere were used as objects of research. Therefore, a spherical caryopsis with density  $\rho_s = (1.15 \dots 1.45) \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , diameter  $2r_s = (3.5 \dots 10.9) \cdot 10^{-3} \text{ m}$  was taken as a model of the seed. We investigated the fall of separately taken spherical caryopses with minimum ( $2r_{s\min} = 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ), average ( $2r_{s\text{mid}} = 7.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ) and maximum ( $2r_{s\max} = 10.9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ) linear dimensions having a density  $\rho_s = 1.15; 1.25; 1.35$  and  $1.45 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , on the surface of an aqueous solution of the dressing agent with a density of  $\rho_{\text{ж}} = 1.00; 1.03; 1.06; 1.09; 1.12$  and  $1.15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  with the corresponding coefficients of surface tension  $\sigma = 0.0727; 0.0755; 0.0771; 0.0786; 0.0801$  and  $0.0816 \text{ N/m}$  and hydrodynamic resistance coefficients  $c = 0.4$  ( $0.5$  for  $\rho_{\text{ж}} = 1.12$  and  $1.15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ). The etching process was considered at a temperature of  $20^\circ\text{C}$ . The minimum drop height  $h$  for overcoming the surface tension of the dressing solution by all caryopses with physical and mechanical parameters with the indicated values should be  $15.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

**Key words:** grain material, grain cleaning machine, Archimedes force, surface tension, spherical grain.

#### References

1. Improving the mechanization of high-quality seed production / V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, A.M. Gievsky, et al. / Advances in Engineering Research. 2018. P. 849-852. DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>

2. Seed refinement in the harvesting and post-harvesting process / V.I. Orobinsky, A.M. Gievsky, I.V. Baskakov, et al // Advances in Engineering Research. 2018. P. 870-874.

3. Schekleina L.M., Sheshegova T.K. *Problema sporyni zlakov (Claviceps purpurea (Fr.) Tul.): istoriya i sovremennost (obzor)*. // *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. [Ergot problem of crops (*Claviceps purpurea (Fr.) Tul.*): History and modernity (review)]. // Theoretical and applied ecology]. 2013. № 1. P. 5-12.

4. Sheshegova T.K., Schekleina L.M., Utkina E.I. Immunological characteristics of winter rye varieties. [Immunologicheskaya kharakteristika sortov ozimoy rzhii]. // *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. - Agrarian science of Euro-North-East*. 2018. № 4 (65). P. 30-35. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35>.

5. Shchekleina L.M., Sheshegova T.K. Ergot is harmful for new varieties of winter rye in Kirov region. [Sporynya vredna dlya novykh sortov ozimoy rzhii v Kirovskoy oblasti]. // *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta. – The Herald of Mari State University*. 2018. №2 (14). P. 83-90. DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89>

6. *Ustoychivost sortov rzhii k sporyni i sodержaniyu alkaloidov sporyni u sclerotia claviceps purpurea v usloviyakh Kirovskoy oblasti*. // *Mikologiya i fitopatologiya*. (Resistance of rye varieties to ergot and the content of ergot alkaloids in sclerotia claviceps purpurea in the conditions of Kirov region. / T.K. Sheshegova, L.M. Shcheklein, V.P. Zhelifonova and others. // Mycology and Phytopathology). 2019. № 3. P. 177-182. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026364819030127>

7. Sources of resistance of spring barley to helminthosporous diseases and their use in breeding. [Istochniki ustoychivosti yarovogo yachmenya k gelmintosporistym boleznyam i ikh ispolzovanie v selektsii]. / T.K. Sheshegova, I.N. Schennikova, L.M. Shchekleina and others. // *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka. - Agricultural science of Euro-North-East*. 2016. № 5. P. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2016.54.5.09-14>
8. Fusarium root rot of grain crops in Western Siberia and the Trans-Urals. [Fuzarioznye kornevye gnili zernovykh kultur v Zapadnoi Sibiri i Zaurale]. / E.Yu. Toropova, O.A. Kazakova, I.G. Vorobeva and others. // *Zaschita i karantin rastenii. - Plant protection and quarantine*. 2013. №9. P. 23-26.
9. Abelentsev V.I. Possibilities of modern seed dressing agents for grain crops. [Vozmozhnosti sovremennykh protraviteley semyan zernovykh kolosovykh kultur]. // *Zaschita i karantin rastenii. - Plant protection and quarantine*. 2011. № 2. P. 19-22.
10. Porsev I.N., Toropova E.Yu., Malinnikov A.A. The effectiveness of seed disinfectants in limiting root rot of spring wheat. [Effektivnost protraviteley semyan v ogranichenii kornevykh gniley yarovoy pshenitsy]. // *Zaschita i karantin rastenii. - Plant protection and quarantine*. 2016. № 2. P. 24-26.
11. Timofeev V.N., Garbar L.I. *Osobennosti vliyaniya protraviteley i ikh smesey na patogennuyu mikrofloru semyan*. // *Problemy mikologii i fitopatologii v XXI veke: Materialy mezhdunar. nauch. konf., posvyasch. 150-letiyu so dnya rozhd. chl.-korr. AN SSSR, prof. A.A. Yachevskogo*. (Features of the influence of dressing agents and their mixtures on the pathogenic microflora of seeds. // Problems of mycology and phytopathology in the XXI century: Proceedings of International scientific conference, dedicated 150<sup>th</sup> anniversary of the birth. Corresponding Member USSR Academy of Sciences, prof. A.A. Yachevsky). SPb: OOO «Kopi-R Grupp», 2013. P. 262-264.
12. Trishkin D.S. *Spravochnik agronoma po voprosam protravlivaniya semyan zernovykh kultur*. [An agronomist's handbook on seed dressing of grain crops]. M.: Bayer CropScience, 2006. P. 42.
13. Study of strength and sowing qualities of winter wheat seeds using fractional technology of post-harvest grain processing. [Issledovanie prochnostnykh i posevnykh kachestv semyan ozimoy pshenitsy po fraktsionnoy tekhnologii posleuborochnoy obrabotki zerna]. / V.I. Orobinskiy, A.M. Gievskiy, A.P. Tarasenko and others. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. - The Herald of Voronezh State Agrarian University*. 2019. Vol. 12. № 62 (3). P. 13-18. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.3.13>
14. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A.M. Gievsky, V.I. Orobinsky, A.P. Tarasenko, et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>.
15. Andreev V.L. Calculation of the effective separation of light impurities in the inertial jalousie-counter-current dust collector. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering International Workshop «Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering». 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/537/3/032097>
16. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a grain cleaning machine for small farms. AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. 2011. №4. P. 37-40.
17. Pat. 2710715 Rossiyskaya Federatsiya, MPK V02V 1/04. *Mashina dlya otdeleniya sporyni ot semyan rzhi*. [Machine for separating ergot from rye seeds]. / V.A. Sysuev, A.V. Saitov, V.G. Farafonov and others; zayavitel Federalnoe gosudarstvennoe nauchnoe uchrezhdenie "Federalnyy agrarnyy nauchnyy tsentr imeni N.V. Rudnitskogo". № 2019114802; applied 14.05.2019, published 10.01.2020, bulletin № 1.
18. Theoretical background of calculating of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia / V.A. Sysuev, V.E. Saitov, V.G. Farafonov, et al. // Russian Agricultural Sciences. 2017. №3. P. 273-276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>.
19. Malis A.Ya., Demidov A.R. *Mashiny dlya ochistki zerna vozdushnym potokom*. [Air flow grain cleaning machines]. M.: Mashgiz, 1962. P. 176.
20. Burkov A.I., Sychugov N.P. *Zernoochistitelnye mashiny. Konstruktsiya, issledovanie, raschet i ispytanie*. [Grain cleaning machines. Construction, research, calculation and testing]. Kirov: NIISKh Severo-Vostoka, 2000. P. 261.
21. Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoreticheskaya fizika: Gidrodinamika / 5-e izd., stereot.* [Theoretical Physics: Hydrodynamics. 5<sup>th</sup> edition]. M.: Fizmatlit, 2001. Vol. 4. P. 736.
22. Chubik I.A., Maslov A.M. *Spravochnik po teplofizicheskim kharakteristikam pischevykh produktov i polufabrikatov*. [Handbook on thermophysical characteristics of food and semi-finished products]. M.: Pischevaya promyshlennost, 1970. P. 184.
23. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoe soprotivlenie: spravochnoe posobie*. [Heat transfer and hydrodynamic resistance: a reference guide]. M.: Energoatomizdat, 1990. P. 365.

**Authors:**

Sysuev Vasily Alekseevich - Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor, scientific supervisor, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru)  
 Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy, Kirov, Russia  
 Saitov Viktor Efimovich – Doctor of Technical sciences, senior researcher, Professor of the Department of Operation and Repair of Machine and Tractor Park, e-mail: [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru)  
 Federal Agrarian Scientific Center of the North-East named after N.V. Rudnitskiy, Kirov, Russia  
 Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia  
 Farafonov Vyacheslav Georgievich – Ph.D. of Physical and Mathematical sciences, Head of Mathematics and Physics Department, e-mail: [farwg@mail.ru](mailto:farwg@mail.ru)  
 Saitov Aleksey Viktorovich – Master's student, e-mail: [alexeysaitov@yandex.ru](mailto:alexeysaitov@yandex.ru)  
 Malykh Tatyana Viktorovna - senior lecturer of Mathematics and Physics Department, e-mail: [tvmarykh@yandex.ru](mailto:tvmarykh@yandex.ru)  
 Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russia

**Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of the State Assignment of the Federal State Budgetary Scientific Institution FANTs of the North-East (topic No. 0767-2019-0094) "Creation of innovative technologies and technologies of a new generation for the mechanization of crop production and animal husbandry, adapted to the climatic conditions of the north-east of the European part of Russia" and on the scientific topic "Physical and mathematical modeling of separation of grain materials" of Mathematics and Physics Department of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vyatka State Agricultural Academy" (Kirov, Russia).