



Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом

В. Е. Саитов^{1,2*}, В. Г. Фарафонов², А. В. Саитов²

¹ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (г. Киров, Россия)

²ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (г. Киров, Россия)

*vicsait-valita@e-kirov.ru

Введение. Комбайновый зерновой материал содержит кроме полновесного зерна сорные примеси, в том числе вредные, к которым относятся ядовитые склероции спорыньи. Существующие зерноочистительные машины не обеспечивают в ходе одного технологического процесса полное выделение ядовитых склероций спорыньи из-за схожести физических свойств. Полное выделение спорыньи из зерна за один технологический процесс возможно по плотности применением водных растворов неорганических солей. Поэтому актуальным вопросом является разработка машины выделения вредных примесей мокрым способом.

Материал и методы. Рассматривается падение отдельных зерен ржи, пшеницы, ячменя и овса, имеющих форму, близкую к эллипсоиду, из выходного отверстия загрузочного бункера в жидкость плотностью 1,0; 1,05; 1,10 и 1,15 · 10³ кг/м³. Теоретические исследования выполнены при плотности зерен (1,2...1,5) · 10³ кг/м³, длине (5,0...10,0) · 10⁻³ м, ширине (1,4...3,6) · 10⁻³ м и толщине (1,2...3,5) · 10⁻³ м методами математического моделирования с применением законов механики и гидродинамики.

Результаты исследования. Для разработки машины выделения вредных примесей мокрым способом проведена оценка высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности водного раствора соли. Получены формулы для определения минимальной высоты, необходимой для преодоления эллипсоидальной зерновкой силы Архимеда, сил поверхностного натяжения и гидродинамического сопротивления жидкости с учетом закона сохранения энергии.

Обсуждение и заключение. Установлено, что минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности жидкости зависит от ориентации зерновок в момент вхождения в нее, их линейных размеров и плотности, а также плотности водного раствора соли. Высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера, необходимая для гарантированного преодоления поверхностного натяжения жидкости всеми зерновками, составляет 57,1 · 10⁻³ м.

Ключевые слова: зерновой материал, спорынья, зерноочистительная машина, сила гидродинамического сопротивления, сила Архимеда, поверхностное натяжение, эллипсоидальная зерновка

Для цитирования: Саитов, В. Е. Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом / В. Е. Саитов, В. Г. Фарафонов, А. В. Саитов. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.355-376 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 355–376.

© Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia

V. E. Saitov^{a,b*}, V. G. Farafonov^b, A. V. Saitov^b

^a*Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (Kirov, Russia)*

^b*Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russia)*

**vicsait-valita@e-kirov.ru*

Introduction. The grain collected by a combine contains not only full-weight grain, but also weeds, including harmful ones, which include toxic *ergot sclerotia*. Existing grain cleaning machines cannot provide complete separation of toxic *ergot sclerotia* during a single technological process, because of the similarity of physical properties. A complete separation of ergot from grain in one technological process is possible by density using aqueous solutions of inorganic salts. Therefore, an urgent issue is the development of a machine for separating harmful impurities in a wet way.

Materials and Methods. We consider the fall of grains of rye, wheat, barley and oats, which have a shape close to ellipsoidal, from the outlet of the loading hopper into a liquid with a density of 1.0; 1.05; 1.10 and $1.15 \cdot 10^3$ kg/m³. Theoretical explorations were undertaken for grain density $(1.2...1.5) \cdot 10^3$ kg/m³, a length $(5.0...10.0) \cdot 10^{-3}$ m, a width $(1.4...3.6) \cdot 10^{-3}$ m and thickness $(1.2...3.5) \cdot 10^{-3}$ m by mathematical modeling methods using the laws of mechanics and hydrodynamics.

Results. For the development of a machine for a wet separation of harmful impurities, the height of the location of the outlet of the loading hopper relative to the surface of an aqueous salt solution was estimated. The formulas are obtained for determining the minimum height required to overcome the Archimedean ellipsoid grain force, surface tension forces and fluid hydrodynamic resistance, taking into account the law of conservation of energy.

Discussion and Conclusion. It was found that the minimum height of the loading hopper outlet location relative to the liquid surface depends on the orientation of the grains at the moment of entering it, their linear dimensions and density, as well as the density of an aqueous salt solution. The height of the outlet of the loading hopper, necessary for guaranteed overcoming of the surface tension of the liquid by all grains, is $57.1 \cdot 10^{-3}$ m.

Keywords: grain material, ergot, grain cleaning machine, hydrodynamic drag force, Archimedes force, surface tension, ellipsoidal grain

For citation: Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):355-376. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376>

Введение

Люди с древних времен для питания использовали продукты, приготовленные из зерна. С появлением механизации и увеличением производительности труда, повышением урожайности зерновых культур за счет применения органических и минеральных удобрений

излишки зерна, в особенности фуражное зерно, стали применять для приготовления различных кормов для сельскохозяйственных животных¹.

Современная технология производства зерна предусматривает применение энергоресурсосберегающих сельскохозяйственных машин. Для уборки зерно-

¹ Кобышев Н. Л. Разработка и совершенствование технологических линий и технических средств послеуборочной обработки зерна и семян трав. Киров: ФГБНУ «ФАНЦ Северо-Востока», 2018. 348 с.; Энергия ржи для здоровья человека / В. А. Сысуев [и др.]. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2010. 103 с.

вых культур в настоящее время сельскохозяйственные предприятия применяют отечественные и зарубежные зерноуборочные комбайны, механизмы очистки которых не обеспечивают полное удаление различных примесей из обмолачиваемой хлебной массы [1; 2].

Комбайновый зерновой материал, поступающий на пункты послеуборочной обработки, содержит кроме полновесного зерна различные сорные примеси, в том числе вредные (семена вязеля, горчачка, мышатника, плевела, куколя), а также ядовитые склероции (рожки) спорыньи² [3; 4].

Посевы хлебных злаковых культур (рожь, пшеница овес, ячмень) и кормовых злаковых трав (пырей, костер, райграс, овсяница, тимофеевка) часто поражаются спорами спорыньи. При поражении колосьев данных злаковых культур вместо зерен образуются склероции продолговатой формы, а в зерновой массе они присутствуют в виде продолговатых рожков черно-фиоле-

тового цвета, в ряде случаев из-за мутаций подстраиваются под цвет зерна (рис. 1) [5; 6].

В решении Комиссии Таможенного союза ЕврАзЭС отмечается, что в хлебном зерне ржи и пшеницы содержание склероций спорыньи не должно превышать 0,05 %, а в хлебном зерне ячменя и овса – 0,1 %. В кормовом зерне ржи, пшеницы, ячменя и овса предельное содержание склероций спорыньи не должно превышать 0,1 %³.

Зерно сельскохозяйственных культур для посева должно быть очищено от всех примесей и доведено до сортовых и посевных требований. Присутствие склероций спорыньи в оригинальных семенах не допускается. Содержание склероций спорыньи в элитных семенах не должно превышать 0,03 %⁴.

Выполнение таких жестких требований к продовольственному, кормовому и семенному зерну связано с тем, что склероции спорыньи являются чрезмерно ядовитыми. Употребление



Р и с. 1. Общий вид озимой ржи, зараженной спорыньей: а) колос озимой ржи со склероцием спорыньи пурпурной; б) зерно озимой ржи со склероциями спорыньи

F i g. 1. General view of winter rye infected with ergot: a) spike of winter rye with ergot purple sclerotia; b) winter rye grain with ergot sclerotia

² **Сантов В. Е.** Инновации в послеуборочной обработке зернового материала: монография. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.

³ Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 015/2011 «О безопасности зерна». Утв. решением Таможенного союза 09.12.2011 г. № 874. 38 с.

⁴ ГОСТ Р 52325-2005. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия.

зараженных ядовитыми склероциями спорыньи продуктов питания людьми и кормов животными влечет отравление организма и может в зависимости от тяжести приводить к смертельному исходу. Поэтому продукты из зерен хлебных злаковых культур со склероциями спорыньи нельзя использовать для выпечки хлебобулочных изделий и приготовления комбикормов [7; 8].

Таким образом, выделение ядовитых склероций спорыньи из зернового материала является первоочередной необходимостью получения качественных семян для посева, а также пригодного продовольственного и фуражного зерна для питания людей и животных.

Отделение примесей из бункерной зерновой массы осуществляется сложными по конструкции, трудоемкими в технологических регулировках и обслуживании зерноочистительными машинами предварительной, первичной и вторичной очистки, а также специальными машинами (например, пневмосортировальными столами, фотосепараторами, магнитными сепараторами), требующими высококвалифицированного обслуживания. В этих машинах используются в основном различия зерна и примесей по линейным размерам (длина, ширина, толщина и форма), скорости витания (аэродинамические свойства), состоянию поверхности и плотности, сыпучести, электропроводности и цвету [9]. Данные машины не обеспечивают в ходе одного технологического процесса полное выделение ядовитых склероций спорыньи от зерна из-за близости их свойств по линейным размерам, скорости витания, а также по цвету из-за мутаций и подстраивания

склероций спорыньи к цвету зерна основной культуры⁵ [10–14].

Одним из свойств, по значениям которого ядовитые склероции спорыньи отличаются от семян основных зерновых культур (рожь, пшеница, овес и ячмень), является плотность. Это позволяет использовать водные растворы неорганических солей, плотность которых можно сделать промежуточной между плотностью склероций спорыньи и зерна в качестве их разделителя⁶.

Соответственно, для очистки зерна от ядовитых склероций спорыньи по плотности в водных растворах солей актуальным вопросом является разработка несложной по конструкции машины очистки зернового материала, которая должна иметь малую энергоемкость технологического процесса в сравнении с существующими зерно- и семяочистительными машинами. При разработке такого устройства и выполнении им процесса выделения ядовитых склероций спорыньи из зерна с надлежащей эффективностью требуются исследования по обоснованию высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера с зерновым материалом h относительно поверхности водного раствора соли в ванне данного устройства [15; 16].

Обзор литературы

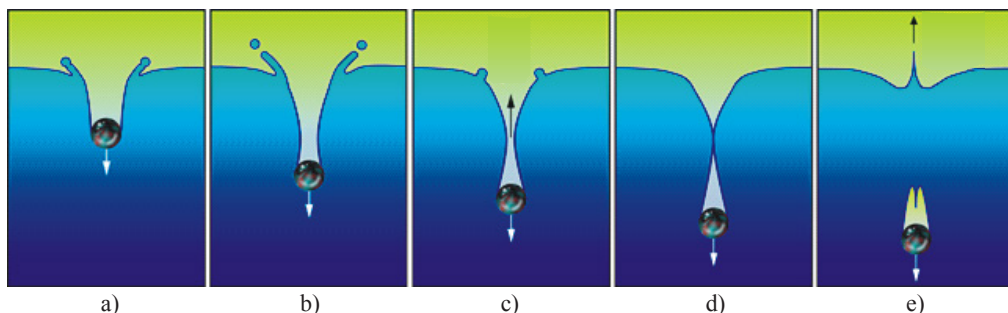
Процесс погружения в воду стального шарика, покрытого тонким слоем пластилина, диаметром $10,0 \cdot 10^{-3}$ м при падении на ее поверхность с высоты 0,2 м приведен в работе В. В. Майера (рис. 2)⁷.

При падении шарика на поверхность воды образуется каверна – воздушное углубление. По мере углу-

⁵ **Сантов А. В.** Особенности функционирования фотосепараторов для очистки зерна и семян от примесей // Методы и технологии в селекции растений и растениеводстве: монография / Под общ. ред. В. А. Сысуева, Г. А. Баталовой, Е. М. Лисицына. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2016. С. 352–355.

⁶ **Павловский Г. Т., Птицын С. Д.** Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. 2-е изд., исправ. и доп. М.: Высшая школа, 1972. 256 с.

⁷ **Майер В. В.** Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 192 с.



Р и с. 2. Падение в воду не смачиваемого ею стального шарика и стадии образования кумулятивной струи: а) соударение шарика с поверхностью воды с образованием каверны; б) начало погружения шарика в воду с увеличением каверны; в) погружение шарика в воду с последующей перетяжкой каверны; д) дальнейшее погружение шарика в воду и начало схлопывания каверны; е) погружение шарика в воду с воздушным пузырьком и образование кумулятивной струи

F i g. 2. Falling into water of a steel ball not wetted by it and the stage of formation of a cumulative jet: a) collision of the ball with the surface of the water to form a cavity; b) beginning of immersion of the ball in water with an increase in the cavity; c) immersion of the ball in water with the subsequent hauling of the cavity; d) further immersion of the ball in water and the beginning of collapse of the cavern; e) immersion of the ball in water with an air bubble and formation of a cumulative jet

бления шарика в воду каверна растет, а затем на ней появляется перетяжка, которая разделяет каверну на воздушный пузырь, примыкающий к шарик, и коническое углубление на поверхности воды. Далее коническое углубление схлопывается и появляется кумулятивная струя, а воздушный пузырь вместе с шариком погружается либо отрывается от него и всплывает на поверхность воды.

В статье В. А. Архипова и В. Ф. Трофимова представлены результаты экспериментального исследования по ударному взаимодействию падающей с высоты 0,45...1,73 м сферической капли воды диаметром $(0,04...0,05) \cdot 10^{-3}$ м на поверхность жидкости⁸. В результате удара капли о поверхность жидкости образуется сферическая каверна и корона, стремящаяся образовать купол над каверной. Дальнейшее развитие

процесса приводит к разрушению каверны с короной и образованию столбика воды.

Падение тела диаметром 1,68 м с высоты 0,3 м в резервуар с жидкостью рассмотрено А. А. Комаровым и В. В. Казенновым [17]. При поступлении тела в жидкость в ней образуется каверна, затем происходит погружение тела в жидкость с захватом пузыря воздуха. В дальнейшем по мере погружения каверна размывается и сносится.

Проблеме падения тела в жидкость посвящены работы Ю. Сколана и А. Коробкина, Т. Шибу, А. Ито и Е. Накаяма, Э. И. Григолюка и А. Г. Горшкова, в которых отмечаются процессы образования каверны, захвата пузырька воздуха телом, появления кумулятивного эффекта в результате схлопывания каверны, отрыва пузырька воздуха от тела и всплытия на поверхность жидкости⁹ [18; 19].

⁸ Архипов В. А., Трофимов В. Ф. Образование вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 46, № 1. С. 55–62.

⁹ Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). Л.: Судостроение, 1978. 200 с.; Shibue T., Ito A., Nakayama E. Structural Response Analysis of Cylinders under Water Impact // Hydroelasticity in Marine Technology. 1994. Pp. 221–228.

Из перечисленного следует, что захват пузырька воздуха телом и появление кумулятивной струи зависит от высоты его падения в жидкость h . Образование кумулятивной струи не будет происходить при падении зерновки на поверхность воды либо водного раствора соли с минимальной высоты h , обеспечивающей гарантированное преодоление ею поверхностного натяжения жидкости. При этом качественное выполнение технологического процесса очистки зерна от вредных примесей данным устройством будет выполняться.

В научных работах ряда ученых теоретически рассматривается расположение по высоте h выходного отверстия загрузочного бункера относительно уровня водного раствора соли плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ для цилиндрической и сфероидальной зерновок плотностью $\rho_z = (1,2 \dots 1,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, длиной $l_z = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, шириной и толщиной $r_z = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{10}$ [20].

Однако зерновка основных культур (ржи, пшеницы, ячменя и овса) характеризуется длиной l_z , шириной b и толщиной δ . Вследствие этого геометрическая форма зерновки более соответствует эллипсоиду, чем цилиндрической и сфероидальной зерновке. Поэтому в данной работе будет рассмотрено падение эллипсоидальной зерновки из выходного отверстия загрузочного бункера и погружение ее в жидкость. В научных публикациях данный подход по исследованию погружения эллипсоидальных зерновок в жидкость различной плотности ρ_{zh} не рассматривался.

Материалы и методы

Рассматривается падение отдельных зерен хлебных злаковых культур (пшеницы, овса, ржи и ячменя), имеющих плотность $\rho_z = (1,2 \dots 1,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, длину $l_z = (5,0 \dots 10,0) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, ширину $b = (1,4 \dots 3,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и толщину $\delta = (1,2 \dots 3,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, из выходного отверстия загрузочного бункера в воду (H_2O) плотностью $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и в водный раствор соли хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,05; 1,10$ и $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, коэффициенты σ поверхностного натяжения которых при нормальных условиях ($t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$) составляют 0,0723, 0,0765, 0,0791 и 0,0816 Н/м соответственно¹¹.

По геометрической форме зерновки основных хлебных злаковых культур (пшеницы, овса, ржи и ячменя) схожи между собой и имеют вытянутую округлую форму (рис. 3). У зерна данных культур с одной стороны проходит бороздка, которая заходит вглубь него. На остром конце зерна с выпуклой его стороны расположен зародыш, а противоположный конец зерна тупой, покрытый волосками.

Зерно пшеницы и ржи покрыто семенными и плодовыми оболочками, а потому они относятся к голозерным культурам. Зерновка пшеницы по форме имеет более округлую форму, чем зерновка ржи, которая отличается сжатой с боков продолговатой формой (рис. 3а и 3б).

Плоды ячменя и овса относятся к пленчатым культурам, так как зерновки покрыты чешуями или пленками. По внешнему виду зерновки ячменя и овса похожи на зерновки пшеницы и ржи,

¹⁰ **Сайтов В. Е., Фарафонов В. Г., Сайтов А. В.** Оценка высоты расположения выхода бункера с питателем относительно уровня раствора соли в ванне машины для очистки зернового материала по удельному весу // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. Мосоловские чтения: материалы Международ. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола: ФГБОУ ВО «Мар. гос. ун-т», 2016. Вып. XVIII. С. 241–244.

¹¹ **Павловский Г. Т., Птицын С. Д.** Очистка, сушка и активное вентилирование зерна; ГОСТ 8.428-81 (СТ СЭВ 630-84). Аэрометры. Значения коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей; **Сайтов В. Е.** Инновации в послеуборочной обработке...



Р и с. 3. Общий вид зерновок основных зерновых культур: а) зерновки пшеницы; б) зерновки ржи; в) зерновки ячменя; д) зерновки овса

F i g. 3. General view of the grains of the main crops: а) wheat grains; б) rye grains; в) barley grains; д) oats grains

но имеют более заостренные верхние и нижние концы (рис. 3с и 3д).

По внешнему виду, геометрической форме и линейным размерам зерновки основных культур (рожь, пшеница, ячмень и овес) наиболее соответствуют эллипсоиду, который имеет малую $2c_z = \delta$, среднюю $2b_z = b$ и большую $2a_z = l_z$ оси. Тогда в качестве теоретической модели зерновки, падающей из выходного отверстия загрузочного бункера на поверхность воды (H_2O) или водного раствора соли ($NaCl$), принята форма эллипсоида. В соответствии с этим введено научное понятие «эллипсоидальная зерновка».

При падении зерновки из выходного отверстия загрузочного бункера на поверхность воды (H_2O) или водного раствора соли ($NaCl$) исключается сила R сопротивления воздуха из-за малого ее значения по сравнению с силой тяжести m_zg зерновки. Для преодоления

силы поверхностного натяжения жидкости зерновкой минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h , с которой она должна падать, находится при учете закона сохранения энергии.

Теоретические исследования выполнены методами математического моделирования с применением законов механики и гидродинамики. Обработка полученных данных проведена на персональном компьютере Samsung NP-R540H с применением разработанной программы «Вычисление минимальной высоты падения зерновок для преодоления поверхностного натяжения жидкости» на языке программирования Python в среде разработки Visual Studio 2019¹².

Для визуализации полученных данных использована специальная программа SigmaPlot 11.0. Полученные зависимости представлены в виде по-

¹² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666718. Вычисление минимальной высоты падения зерновок для преодоления поверхностного натяжения жидкости / Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Фарафонова А. Е. [и др.]; заявитель и правообладатель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2019663539; заявл. 29.10.2019; зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.12.2019.

верхностей при помощи редактора векторной графики CorelDRAW 12¹³.

Результаты исследования

Зерна хлебных злаковых культур покрыты несмачиваемыми пленками, а потому большинство из них не тонет в жидкости при бросании с высоты $h = (2,0 \dots 5,0) \cdot 10^{-3}$ м. При такой высоте h запасенная потенциальная энергия зерна мала для проникновения в жидкость. Это не позволяет преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости¹⁴.

Вид зерен, обладающих несмачиваемыми пленками и находящихся на поверхности жидкости, показан на рисунке 4.

Рассмотрим две крайние ориентации (расположения) эллипсоидальной зерновки, выходящей из отверстия загрузочного бункера, главной малой осью $2c_z = \delta$ по вертикали (плашмя) и главной большой осью $2a_z$ по вертикали. Полагаем, что зерновка движется в жидкость и сохраняет начальное расположение (ориентацию). Численные

значения результатов для промежуточных расположений эллипсоидальной зерновки будут находиться между значениями, полученными для двух крайних расположений.

Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при движении из выходного отверстия загрузочного бункера и проникновении в жидкость, показаны на рисунке 5.

Максимальное значение силы сопротивления воздуха при движении эллипсоидальной зерновки у поверхности жидкости \vec{R} сопоставим со значением силы $m_z \vec{g}$ тяжести зерновки. Считаем нулевой начальную скорость v_0 зерновки на выходе из загрузочного бункера¹⁵:

$$R = \frac{m_z g v_z^2}{v_{vit}^2} = \frac{m_z v_z^2}{2} \cdot \frac{2g}{v_{vit}^2} = m_z g h \frac{2g}{v_{vit}^2} = \frac{2gh}{v_{vit}^2} m_z g, \quad (1)$$



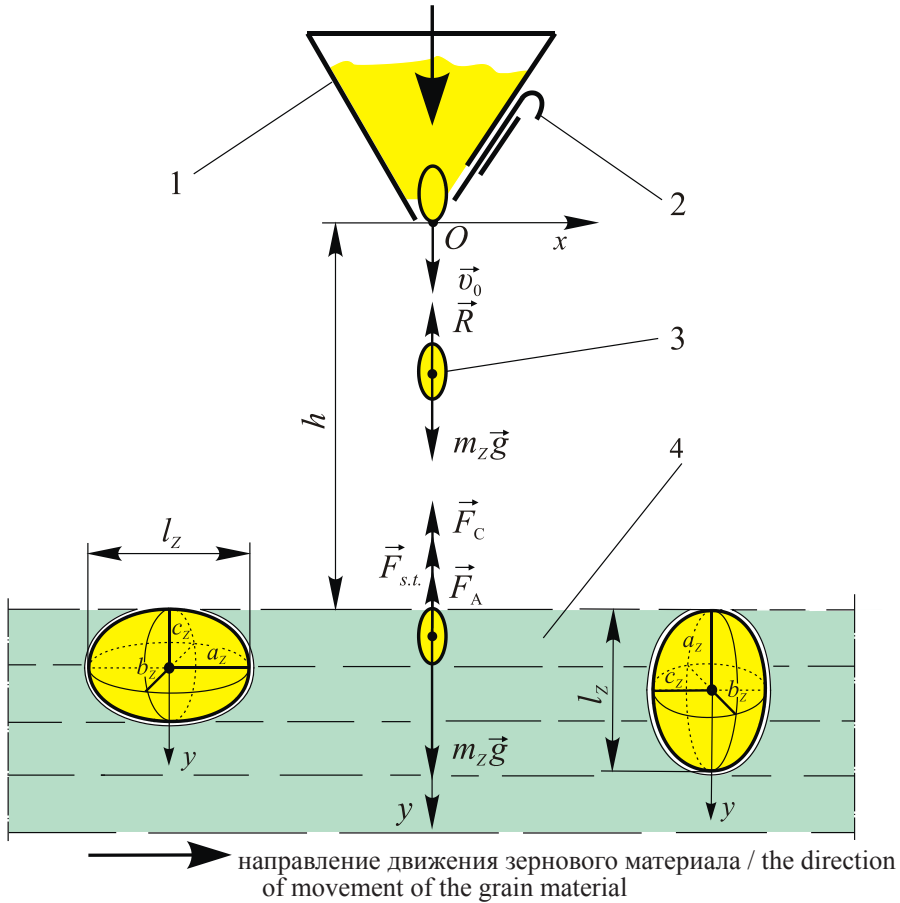
Р и с. 4. Вид зерен, обладающих несмачиваемыми пленками, находящихся на поверхности жидкости

Fig. 4. View of grains with non-wetting films located on the surface of the liquid

¹³ Леонов В. Большая энциклопедия компьютера. М.: Эксмо, 2015. 400 с.; Лебедев А. Н. Полный самоучитель Excel 2013. СПб.: Питер, 2014. 128 с.; Sigma Plot – Scientific Data Analysis and Graphing Software [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sigmaplot.co.uk/products/sigmaplot/> (дата обращения: 27.07.2020).

¹⁴ Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.

¹⁵ Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.



Р и с. 5. Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при движении из выходного отверстия загрузочного бункера и проникновении в жидкость: 1 – загрузочный бункер; 2 – заслонка регулировочная; 3 – зерновка; 4 – ванна с жидкостью

F i g. 5. Forces acting on an ellipsoidal grain when moving from the outlet of the loading hopper and entering the liquid: 1 – loading hopper; 2 – an adjusting gate; 3 – grain; 4 – bath with liquid

где m_z – масса эллипсоидальной зерновки, кг; g – ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; v_{vit} – скорость парусности (витания) зерновки, м/с; v_z – скорость движения эллипсоидальной зерновки, м/с; h – высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера по отношению к поверхности жидкости, м.

При расчетах полагаем значения высоты $h = (1,0 \dots 5,0) \cdot 10^{-2} \text{ м}$ и скоро-

сти витания $v_{vit} = 7,0 \dots 10,5 \text{ м/с}$ хлебных злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень и овес)¹⁶. Тогда значения силы R на поверхности жидкости будут $(0,18 \dots 2,0) \cdot 10^{-2} m_z g$. Получили, что сила $m_z g$ тяжести эллипсоидальной зерновки (основная сила процесса) значительно больше силы сопротивления воздуха R движению данной зерновки. Вследствие этого сила сопротивления воздуха R не учитывается при определении высо-

¹⁶ Сантов В. Е. Инновации в послеуборочной обработке...

ты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h по отношению к поверхности жидкости.

На выходе из загрузочного бункера эллипсоидальной зерновки и при движении вдоль главной большой оси $2a_z$ или вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) ее потенциальная энергия $m_z gh$ превратится в кинетическую энергию. Данная кинетическая энергия при полном входе зерновки в жидкость и остановке полностью израсходуется на работу против силы $F_{s.t.}$ поверхностного натяжения жидкости, силы Архимеда F_A и силы гидродинамического сопротивления F_C , появляющейся при турбулентном движении из-за разности давлений впереди эллипсоидальной зерновки и за ней¹⁷.

При движении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ и вдоль главной малой оси $2c_z$ величина работы A_n против силы поверхностного натяжения $F_{s.t.}$ будет одинаковой¹⁸:

$$A_n = \sigma \cdot \Delta S, \quad (2)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; ΔS – площадь полной поверхности эллипсоида, на которую увеличилась свободная поверхность жидкости в результате поступления в нее зерновки, м².

Площадь поверхности эллипсоида определяется выражением¹⁹:

$$\Delta S = 2\pi \left[c_z^2 + \frac{c_z^2 b_z}{\sqrt{a_z^2 - c_z^2}} F(t, k) + b_z \sqrt{a_z^2 - c_z^2} E(t, k) \right], \quad (3)$$

где $F(t, k)$ и $E(t, k)$ – эллиптические интегралы первого и второго рода; t, k – аргументы функций $F(t, k)$ и $E(t, k)$.

Эллиптический интеграл первого рода в выражении (3) равен²⁰:

$$F(t, k) = \int_0^t \frac{d\phi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi}}, \quad (4)$$

где ϕ – переменная интегрирования.

Эллиптический интеграл второго рода имеет вид:

$$E(t, k) = \int_0^t \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \phi} d\phi. \quad (5)$$

Аргументы функций $F(t, k)$ и $E(t, k)$ определяются по формулам:

$$t = \arcsin \frac{\sqrt{a_z^2 - c_z^2}}{a_z},$$

$$k = \frac{a_z^2 (b_z^2 - c_z^2)}{b_z^2 (a_z^2 - c_z^2)}. \quad (6)$$

В работе Е. Янке, Ф. Эмде и Ф. Леша эллиптические интегралы первого и второго рода приведены в виде таблиц, зависящих от углов ϕ и α , причем²¹

$$\sin \phi = t, \quad \sin \alpha = k. \quad (7)$$

Аргументы t, k зависят только от линейных размеров зерновок (6), что позволяет найти соответствующие параметры (ϕ, α) таблиц (7), а по ним – значения эллиптических интегралов и площади поверхности эллипсоида (3).

¹⁷ Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: Гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. Т. 4. 736 с.

¹⁸ Андреев Н. Н., Ржевкин С. Н., Горелик Г. С. Курс физики. Под ред. Н. Д. Папалекси. М.: Гостехиздат, 1948. 600 с.

¹⁹ Площадь эллипсоида [Электронный ресурс]. URL: <http://geleot.ru/education/math/geometry/area/ellipsoid> (дата обращения: 27.07.2020).

²⁰ Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. Формулы, графики, таблицы. Перевод с 6-го перераб. немецкого издания / Под ред. Л. И. Седова. М.: Наука, 1964. 344 с.

²¹ Там же.

При полном погружении эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной большой оси $2a_z$ центр тяжести вытесненной жидкости поднимается на высоту большой полуоси эллипсоида a_z , и эта жидкость растеется по поверхности жидкости в ванне разрабатываемого устройства. Показатель увеличения потенциальной энергии вытесненной жидкости по отношению к ее поверхности определяет значение работы против силы Архимеда F_A :

$$A_A = m_{zh} g a_z = \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g a_z, \quad (8)$$

где m_{zh} – масса жидкости, вытесненной эллипсоидальной зерновкой, кг.

Изменение уровня жидкости в ванне при погружении в нее отдельной зерновки не учитывается, так как размеры ванны разрабатываемого устройства значительно больше линейных размеров эллипсоидальной зерновки.

При поступлении в жидкость эллипсоидальной зерновки действующая на нее сила гидродинамического сопротивления F_C находится по формуле²²:

$$F_C = cS \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2, \quad (9)$$

где c – коэффициент гидродинамического сопротивления жидкости при движении в ней эллипсоидальной зерновки, который определяется формой зерновки, скоростью ее движения и вязкостью жидкости; S – площадь миделевого сечения (максимальная площадь проекции эллипсоидальной зерновки на плоскость, перпендикулярную вектору скорости зерновки), м².

Работа, производимая против силы гидродинамического сопротивления F_C

при движении эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$, равна сумме двух работ. В работе, совершаемой зерновкой от момента касания поверхности жидкости до глубины большой полуоси a_z , за миделево сечение принимается переменная площадь $S(y)$ сечения эллипсоидальной зерновки на уровне поверхности жидкости.

Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при падении на поверхность жидкости вдоль главной большой оси $2a_z$, показаны на рисунке 6а.

Эта площадь $S(y)$ сечения эллипсоидальной зерновки равна²³:

$$S(y) = \pi b_z(y) c_z(y), \quad (10)$$

где $b_z(y)$ – переменное значение большой полуоси эллипса, находящегося в сечении эллипсоидальной зерновки поверхностью раствора соли, в который она погружается, м; $c_z(y)$ – переменное значение малой полуоси эллипса, находящегося в сечении эллипсоидальной зерновки поверхностью раствора соли, в который она погружается, м.

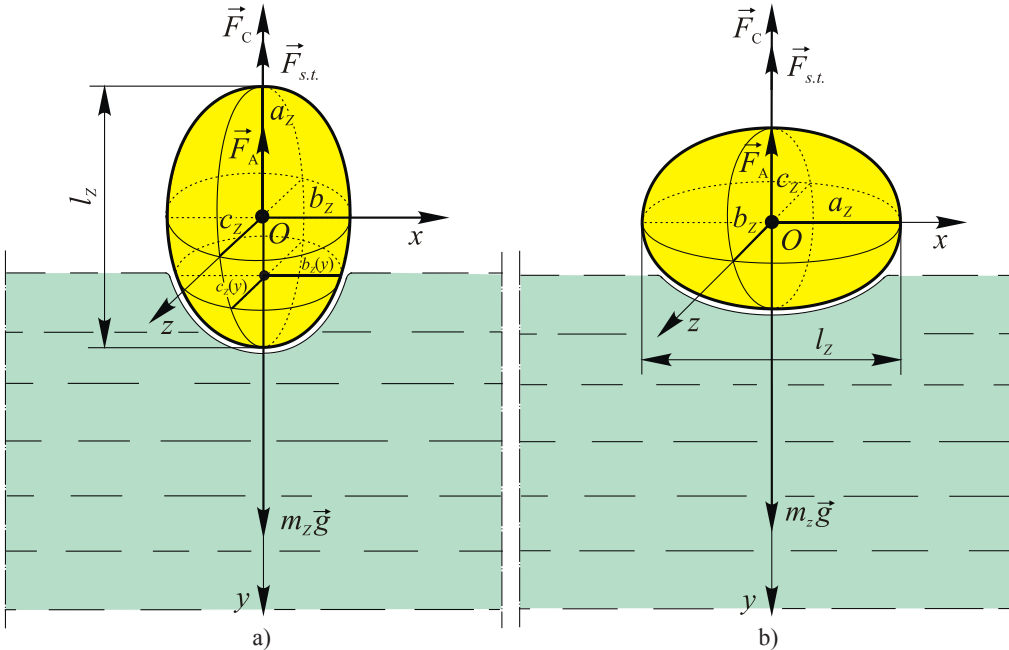
Выражения для полуосей $b_z(y)$ и $c_z(y)$ определяются с помощью двух сечений эллипсоида (рис. 6а), проходящих через главную большую ось $2a_z$ эллипсоида и по осям Ox и Oz соответственно. В этих сечениях получаем эллипсы, уравнения которых будут иметь вид:

$$\frac{y^2}{a_z^2} + \frac{x^2}{b_z^2} = 1, \quad \frac{y^2}{a_z^2} + \frac{z^2}{c_z^2} = 1. \quad (11)$$

Поверхности водного раствора соли, в который вошла эллипсоидальная зерновка, будет соответствовать ордината y . Для этого значения y определим из уравнений (11) выражения для полуосей $b_z(y) = x$ и $c_z(y) = z$:

²² Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика...; Андреев Н. Н., Ржевкин С. Н., Горелик Г. С. Курс физики.

²³ Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М.: Наука, 1980. 976 с.



Р и с. 6. Силы, действующие на эллипсоидальную зерновку при падении на поверхность жидкости: а) при падении зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$; б) при падении зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя)

Fig. 6. Forces acting on an ellipsoidal grain when falling on the surface of a liquid: а) when the grain falls in the direction of the main major axis $2a_z$; б) when the grain falls in the direction of the main minor axis $2c_z$ (flat)

$$b_z(y) = \frac{b_z}{a_z} \sqrt{a_z^2 - y^2},$$

$$c_z(y) = \frac{c_z}{a_z} \sqrt{a_z^2 - y^2}. \quad (12)$$

Первое слагаемое работы против силы F_C найдем в системе координат эллипсоида (рис. 6а), полагая скорость зерновки постоянной, и получим завышенную величину работы A_{1C} :

$$A_{1C} = - \int_{a_z}^0 F_C dy = c \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2 \int_0^{a_z} S(y) dy =$$

$$= c \frac{\pi \rho_{zh} b_z c_z}{2 a_z^2} v_z^2 \int_0^{a_z} (a_z^2 - y^2) dy =$$

$$= \frac{\pi c \rho_{zh} a_z b_z c_z v_z^2}{3} = \frac{c \rho_{zh}}{2 \rho_z} m_z gh. \quad (13)$$

При определении второго слагаемого работы площадь миделевого сечения – постоянная величина ($\pi b_z c_z$):

$$A_{2C} = F_C \cdot a_z = c S \frac{\rho_{zh}}{2} v_z^2 \cdot a_z =$$

$$= \frac{\pi c b_z c_z \rho_{zh} v_z^2 a_z}{2} = \frac{3 c \rho_{zh}}{4 \rho_z} m_z gh. \quad (14)$$

При нахождении полной работы против силы гидродинамического сопротивления F_C сумму работ A_{1C} и A_{2C} умножим на $1/2$ (завышенная величина работы):

$$A_C = \frac{1}{2} (A_{1C} + A_{2C}) =$$

$$= \frac{c \rho_{zh}}{4 \rho_z} m_z gh + \frac{3 c \rho_{zh}}{8 \rho_z} m_z gh =$$

$$= \frac{5 c \rho_{zh}}{8 \rho_z} m_z gh. \quad (15)$$

При полном погружении зерновки в водный раствор соли и остановке сила тяжести $m_z \vec{g}$, приложенная к зерновке, при погружении ее на глубину $2a_z$ вдоль главной большой оси совершит отрицательную работу A_T :

$$A_T = -2m_z g a_z. \quad (16)$$

Потенциальная энергия $m_z g h$ при падении эллипсоидальной зерновки на поверхность жидкости перейдет в кинетическую энергию. Она при полном входе в водный раствор соли и остановке зерновки будет полностью израсходована на найденные ранее работы. Это работает закон сохранения энергии. Потенциальная энергия $m_z g h$ равна сумме правых частей уравнений (2), (8), (15) и (16):

$$m_z g h = \sigma \cdot \Delta S + \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g a_z + \frac{5c\rho_{zh}}{8\rho_z} m_z g h - 2m_z g a_z. \quad (17)$$

Преобразовав соотношение (17), получим выражение для определения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности водного раствора соли при поступлении в него зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$:

$$h = \frac{8}{8\rho_z - 5c\rho_{zh}} \times \left[\frac{3\sigma \cdot \Delta S}{4\pi a_z b_z c_z g} + \rho_{zh} a_z - 2\rho_z a_z \right]. \quad (18)$$

При анализе процесса падения эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной малой оси $2c_z$ (рис. 6b) нужно учесть, что работа против силы поверхностного натяжения жидкости будет такой же, как и при падении вдоль главной большой оси $2a_z$ эллипсоида (2), потому что она зависит

только от коэффициента σ поверхностного натяжения водного раствора соли и площади поверхности эллипсоида ΔS , которые для обоих направлений движения зерновки одинаковы.

При полном погружении эллипсоидальной зерновки в водный раствор соли вдоль главной малой оси $2c_z$ центр тяжести вытесненной жидкости поднимается на высоту малой полуоси эллипсоида c_z , которая растечется по поверхности жидкости в ванне разрабатываемого устройства. Величина увеличения потенциальной энергии вытесненной жидкости по отношению к ее поверхности определяет значение работы против силы Архимеда F_A :

$$F_A = m_{zh} g c_z = \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g c_z. \quad (19)$$

При падении эллипсоидальной зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ работа против силы F_C гидродинамического сопротивления будет такой же, как и при падении зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (15). Это объясняется математическим методом нахождения выражения для работы. При определении первой части работы находится половина объема эллипсоида $\frac{2}{3} \pi a_z b_z c_z$, а при определении второй части работы объем эллиптического цилиндра $\pi a_z b_z c_z$. Эти объемы будут одинаковыми при любом из двух направлений падения эллипсоидальной зерновки, несмотря на разные геометрические формы половин эллипсоидов и эллиптических цилиндров, соответствующих каждому из направлений падения эллипсоидальной зерновки. Математически это объясняется неизменностью выражений для объемов этих тел при взаимной замене длин (a_z на c_z) путей движения эллипсоидальной зерновки, соответствующих каждому из направлений падения.

При полном погружении зерновки в водный раствор соли и остановке сила тяжести $m_z \vec{g}$, приложенная к зерновке,

при погружении ее на глубину $2c_z$ вдоль главной малой оси совершит отрицательную работу A_T силы тяжести:

$$A_T = -2m_z g c_z. \quad (20)$$

При полном входе в водный раствор соли и остановке зерновки потенциальная энергия будет полностью израсходована на найденные ранее работы. Это работает закон сохранения энергии.

Поэтому потенциальная энергия ($m_z g h$) равна сумме правых частей уравнений (2), (15), (19) и (20):

$$m_z g h = \sigma \cdot \Delta S + \frac{\rho_{zh}}{\rho_z} m_z g c_z + \frac{5c\rho_{zh}}{8\rho_z} m_z g h - 2m_z g c_z. \quad (21)$$

После преобразования уравнения (21) получим выражение для определения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h по отношению к поверхности жидкости при проникновении в нее зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя):

$$h = \frac{8}{8\rho_z - 5c\rho_{zh}} \times \left[\frac{3\sigma \cdot \Delta S}{4\pi a_z b_z c_z g} + \rho_{zh} c_z - 2\rho_z c_z \right]. \quad (22)$$

При расчетах по формулам (18) и (22) примем величину коэффициента гидродинамического сопротивления $c = 0,9$. Это выполняется для тел с плохо обтекаемой формой²⁴.

Для зерновки, падающей в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ и вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) и преодолевающей поверхностное натяжение, проведем качественный

анализ полученных зависимостей (18) и (22) минимальной высоты h .

При увеличении плотности зерновки ρ_z , при неизменности значений остальных параметров (a_z , b_z , c_z , ρ_{zh} , c и σ) минимальная высота h уменьшается, так как в правых частях выражений (18) и (22) знаменатели коэффициентов перед квадратными скобками увеличиваются (коэффициенты уменьшаются), и уменьшаются значения квадратных скобок из-за вычитания больших величин ($2\rho_z a_z$) и ($2\rho_z c_z$). Это очевидно, потому что с увеличением плотности зерновки ρ_z увеличиваются ее масса m_z и потенциальная энергия, если высоту h оставить прежней, соответствующей меньшей плотности ρ_z . Поэтому с увеличением плотности зерновки ρ_z требуется меньшая, по сравнению с полученной для меньшей плотности зерновки ρ_z , потенциальная энергия (минимальная высота h), необходимая для преодоления зерновкой поверхностного натяжения водного раствора соли.

Такой же анализ показывает, что с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости при движении эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (18) и при движении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) (22) увеличивается, потому что с увеличением плотности жидкости ρ_{zh} , при неизменных значениях остальных параметров (a_z , b_z , c_z , ρ_z , c), увеличиваются сила Архимеда F_A и сила гидродинамического сопротивления F_C (9), а следовательно, и работа против этих сил (8), (15) и (19), необходимая для проникновения зерновки в водный раствор соли. Увеличивается также величина работы против силы поверхностного натяжения водного раствора соли (2), так как увеличивается соответствующий плотности жид-

²⁴ Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 365 с.

кости ρ_{zh} коэффициент поверхностного натяжения водного раствора соли σ . Из закона сохранения энергии нужно увеличить потенциальную энергию зерновки, а значит увеличить минимальную высоту h , необходимую для преодоления ею поверхностного натяжения водного раствора соли.

При увеличении любого из линейных размеров (a_z , b_z , c_z) эллипсоидальной зерновки и падении по любому из направлений, при неизменности значений остальных параметров (ρ_z , ρ_{zh} , c и σ), минимальная высота h уменьшается. Физически это объясняется тем, что с увеличением любого из линейных размеров (a_z , b_z , c_z) эллипсоидальной зерновки увеличивается ее объем. Следовательно, увеличивается масса зерновки m_z и ее потенциальная энергия, если высоту h оставить прежней, соответствующей меньшему значению линейного размера зерновки. Получается завышенное значение потенциальной энергии, которое нужно уменьшить, изменив минимальную высоту падения зерновки h , необходимую для преодоления поверхностного натяжения жидкости.

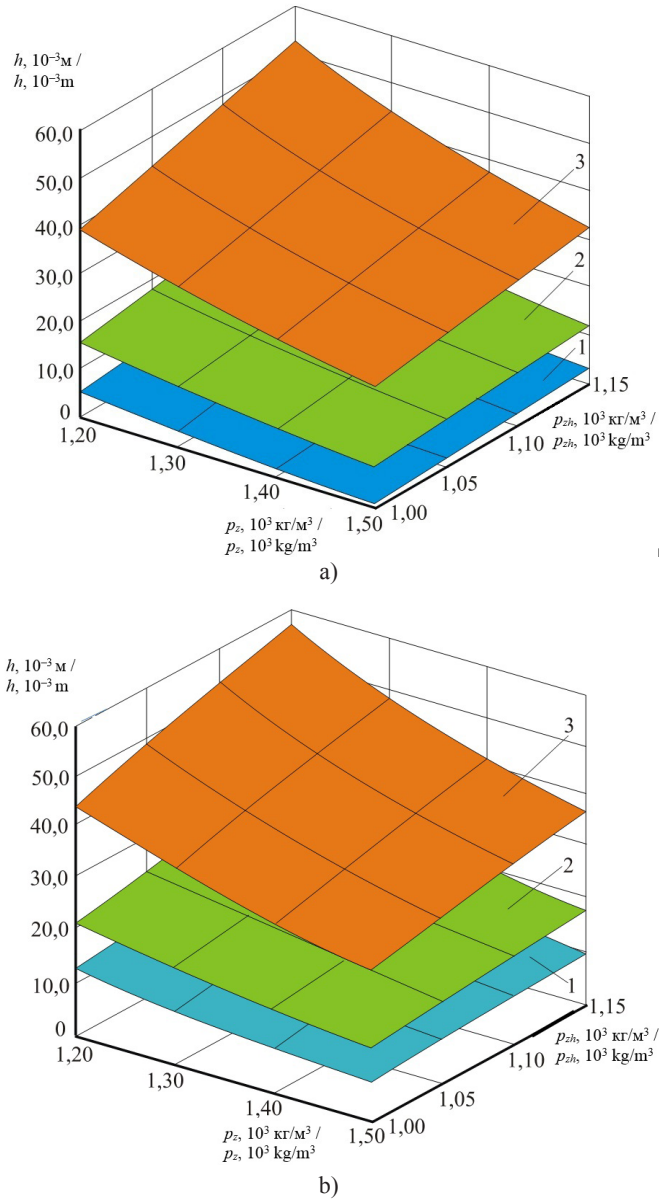
Сравним минимальные высоты h , необходимые для преодоления поверхностного натяжения жидкости при поступлении в нее эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ (вертикальное начальное положение) и при падении вдоль главной малой оси $2c_z$ (горизонтальное начальное положение). Для этого проведем анализ правых частей уравнений (18) и (22) при одинаковых значениях физико-механических свойств зерна и водного раствора соли. В этих условиях минимальная высота h , необходимая для преодоления поверхностного натяжения жидкости при поступлении в нее эллипсоидальной зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя), будет больше аналогичной высоты h при движении вдоль главной большой оси $2a_z$, потому что квадратные скобки в правых частях уравнений (18) и (22) при движении

эллипсоидальной зерновки вдоль главной большой оси $2a_z$ будут меньше, чем при движении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) ($a_z(2\rho_z - \rho_{zh}) > c_z(2\rho_z - \rho_{zh})$). Это объясняется тем, что величина потенциальной энергии эллипсоидальной зерновки, запаасаемая за счет начального геометрического вертикального положения ($2m_z g a_z$), больше, чем для горизонтального ($2m_z g c_z$). Поэтому при горизонтальном начальном положении эллипсоидальной зерновки потенциальная энергия $m_z g h$, а значит и высота h , должна быть больше, чем при вертикальном.

Количественный анализ (расчеты) по выражениям (18) и (22) для хлебных злаковых культур (рожь, пшеница, ячмень и овес) при учете их минимальных ($2a_{\min z}(l_{\min z}) = 5,0 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{\min z}(b_{\min}) = 1,4 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{\min z}(\delta_{\min}) = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м), средних ($2a_{cp z}(l_{cp z}) = 7,5 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{cp z}(b_{cp}) = 2,5 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{cp z}(\delta_{cp}) = 2,35 \cdot 10^{-3}$ м) и максимальных ($2a_{\max z}(l_{\max z}) = 10,0 \cdot 10^{-3}$ м, $2b_{\max z}(b_{\max}) = 3,6 \cdot 10^{-3}$ м, $2c_{\max z}(\delta_{\max}) = 3,5 \cdot 10^{-3}$ м) линейных размеров представлен на рисунке 7 в виде зависимостей минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости от ее плотности ρ_{zh} и плотности зерновки ρ_z .

Из рисунка 7 следует, что при падении эллипсоидальной зерновки, имеющей минимальные либо максимальные или средние линейные размеры, в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$ либо вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) с увеличением ее плотности ρ_z значения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости уменьшаются, а с повышением плотности жидкости ρ_{zh} наоборот возрастают. Поведение поверхностей на рисунке 7 полностью соответствует результатам приведенного выше качественного анализа формул (18) и (22).

Наименьшие значения минимальной высоты расположения выходного



Р и с. 7. Зависимости минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости от ее плотности ρ_{zh} и плотности зерновки ρ_z :

а) при падении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной большой оси $2a_z$;

б) при падении эллипсоидальной зерновки в жидкость вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя);

1 – при максимальных линейных размерах зерновки; 2 – при средних линейных размерах зерновки; 3 – при минимальных линейных размерах зерновки

F i g. 7. Dependences of the minimum height of the outlet opening h of the loading hopper relative to the surface of the liquid on its density ρ_{zh} and density of the grain ρ_z : a) when the ellipsoidal grain is dropped into the liquid in the direction of the main major axis $2a_z$; b) when the ellipsoidal grains fall into the liquid in the direction of the main minor axis $2c_z$ (flat); 1 – with the maximum linear dimensions of the seed; 2 – with average linear sizes of the kernel; 3 – with minimum linear dimensions of the seed

отверстия загрузочного бункера h , необходимые для преодоления поверхностного натяжения жидкости зерновкой, определяются при максимальном значении ее плотности $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и погружении в воду (H_2O) плотностью $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Так, при падении зерновки в воду (H_2O) вдоль главной большой оси $2a_z$ значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $25,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, для средних линейных размеров – $4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки в воду (H_2O) вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) данные значения возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 29,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, для средних линейных размеров $h = 13,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров $h = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

При максимальном значении плотности зерновки $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и погружении вдоль главной большой оси $2a_z$ в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, соответствующей максимальному значению плотности склероций спорыньи ρ_c , значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $32,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров – $11,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) в данную жидкость ее значения высоты h возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 36,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров $h = 17,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, максимальных линейных размеров $h = 9,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Наибольшие значения минимальной высоты расположения выходного отверстия загрузочного бункера h для гарантированного преодоления поверхностного натяжения жидкости зерновкой определяются при минимальном значении ее плотности $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ и вхождении в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значени-

ем плотности спорыньи ρ_c . Так, при вхождении зерновки в водный раствор хлористого натрия (NaCl) вдоль главной большой оси $2a_z$ значение высоты h для минимальных линейных размеров составляет $52,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров – $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а для максимальных линейных размеров – $9,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. При падении зерновки в водный раствор хлористого натрия (NaCl) вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) данные значения возрастают и для минимальных линейных размеров $h = 57,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, средних линейных размеров $h = 28,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, максимальных линейных размеров $h = 17,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Таким образом, минимальная величина высоты нахождения выходного отверстия загрузочного бункера h при гарантированном преодолении поверхностного натяжения жидкости зерновкой при ее наименьшей плотности $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ в зависимости от линейных размеров при вхождении в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значением плотности спорыньи ρ_c , вдоль главной большой оси $2a_z$ варьируется в пределах $(9,8 \dots 52,8) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) – в пределах $(17,1 \dots 57,1) \cdot 10^{-3}$. При погружении в такой же водный раствор хлористого натрия (NaCl) зерновки, имеющей наибольшую плотность $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ вдоль главной большой оси $2a_z$ минимальная высота h расположения загрузочного бункера варьируется в пределах $(2,8 \dots 32,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а при погружении вдоль главной малой оси $2c_z$ (плашмя) – в пределах $(9,9 \dots 36,6) \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Обсуждение и заключение

Минимальная высота расположения выходного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости зависит от ориентации зерновки в момент вхождения в нее, их линейных размеров и плотности ρ_z , а также плотности водного раствора соли ρ_{zh} и его коэффициента поверхностного на-

тяжения σ . Минимальная величина высоты нахождения выходного отверстия загрузочного бункера h , при которой гарантированно происходит преодоление эллипсоидальной зерновкой поверхностного натяжения жидкости плотностью $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, совпадающей с максимальным значением плотности спорыньи, составляет $57,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и определена для минимальных значений линейных размеров и плотности зерновок ржи. Эта высота h , рекомендованная теорией, при поточном поступлении зернового материала в машину выделения вредных примесей мокрым способом будет одной и той же для всех зерен со всевозможными линейными размерами и плотностями.

Такая величина высоты h для большинства зерновок является завышенной. Кинетическая энергия таких зерно-

вок у поверхности жидкости позволит им не только преодолеть поверхностное натяжение жидкости, но и углубиться в нее, образовав каверну с возможным захватом пузырька воздуха.

Полученные в работе результаты совместно с исследованиями, приведенными в статье В. А. Сысуева и соавторов, позволяют рассчитать место расположения устройства разрушения слипшихся в водном растворе соли зерен со склероциями спорыньи из-за поступления зернового материала потоком и отделения от зерен возможно захваченных пузырьков воздуха [21].

Представленные формулы (18) и (22) позволяют выявить области параметров конструкции машины, в которых можно поставить практические эксперименты с минимальными материальными и временными затратами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Aldoshin, N.** Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters / N. Aldoshin, O. Didmanidze. – DOI 10.17221/107/2017-RAE // Research in Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 64, no. 4. – Pp. 209–214. – URL: https://www.agriculturejournals.cz/web/rae.htm?type=article&id=107_2017-RAE (дата обращения: 27.07.2020).
2. **Aldoshin, N.** Work Improvement of Air-And-Screen Cleaner of Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze, N. Lylin [et al.]. – DOI 10.22616/ERDev2019.18.N110 // Engineering for Rural Development: Proceedings of 18th International Scientific Conference. – 2019. – Vol. 18. – Pp. 100–104. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2019/Papers/N110.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
3. **Ponomareva, M. L.** Increasing Spread of Claviceps Purpurea (Fr.) Tul. and It's Effect on the Quantity and Quality of Winter Rye / M. L. Ponomareva, S. N. Ponomarev, G. S. Mannapova [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – Vol. 7, Issue 3. – Pp. 1865–1871. – URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[227\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[227].pdf) (дата обращения: 27.07.2020).
4. **Шешегова, Т. К.** Некоторые приемы и средства защиты озимой ржи от спорыньи / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 3. – С. 47–50. – URL: <http://agroaprk.ru/28-archive/03-2014/187-2014-03-15-ru> (дата обращения: 27.07.2020).
5. **Хазиев, А. З.** Ущерб от спорыньи на озимой ржи и меры его предупреждения / А. З. Хазиев, М. Л. Пономарева // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2007. – Т. 2, № 2 (6). – С. 80–82. – URL: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462 (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
6. **Щеклеина, Л. М.** Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба Claviceps purpurea (Fr.) Tul и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области / Л. М. Щеклеина. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – № 20 (2). – С. 134–143. – URL: <https://www.agronauka-sv.ru/jour/article/view/315> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.

7. **Щеклеина, Л. М.** Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): история и современность (обзор) / Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова. – DOI 10.25750/1995-4301-2013-1-005-012 // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 5–12. – URL: <http://envjournal.ru/ari/v2013/v1/files/13101.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
8. **Шешегова, Т. К.** Зависимость вредоносности спорыньи от биометрических показателей склероциев / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина // Защита и карантин растений. – 2017. – № 11. – С. 9–12.
9. **Astanakulov, K. D.** Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms / K. D. Astanakulov, Y. Z. Karimov, G. Fozilov // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2011. – Vol. 42, no. 4. – Pp. 37–40.
10. **Savinyh, P.** Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain / P. Savinyh, Y. Sychugov, V. Kazakov [et al.]. – DOI 10.22616/ERDev2018.17.N156 // Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. – 2018. – Pp. 124–130. – URL: <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2018/Papers/N156.pdf> (дата обращения: 27.07.2020).
11. **Saitov, V. E.** Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines / V. E. Saitov, R. F. Kurbanov, A. N. Suvorov. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.06.728 // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 107–110. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816312772?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).
12. **Gievsky, A. M.** 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.]. – DOI 10.1088/1757-899X/327/4/042035 // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327. – P. 042035. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/327/4/042035> (дата обращения: 27.07.2020).
13. **Дринча, В. М.** Применение и функциональные возможности пневмосортировальных столов / В. М. Дринча, И. Б. Борисенко // Научно-агрономический журнал. – 2008. – № 2 (83). – С. 33–36.
14. **Шафоростов, В. Д.** Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян подсолнечника / В. Д. Шафоростов, И. Е. Припоров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2015. – № 1 (32) – С. 23–25. – URL: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-tehnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika/> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
15. **Патент № 2667066 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04.** Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2017115170/03 : заявл. 27.04.2017 : опубл. 18.09.2018 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». – 10 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2667066C1_20180918 (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
16. **Патент № 2689470 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04.** Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2018136461/03 : заявл. 15.10.2018 : опубл. 28.05.2019 / Сaitov А. В., Гагауллин Р. Г., Сaitov В. Е. ; заявитель и патентообладатель Сaitov А. В. – URL: <https://findpatent.ru/patent/268/2689470.html> (дата обращения: 27.07.2020).
17. **Комаров, А. А.** Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок / А. А. Комаров, В. В. Казеннов. – DOI 10.22227/1997-0935.2014.5.135-143 // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 135–143. – URL: <http://vestnikmgsu.ru/ru/component/sjarchive/issue/article.display/2014/5/135-143> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.
18. **Scolan, Y.** Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body Onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid / Y. Scolan, A. Korobkin. – DOI 10.1016/S0889-9746(02)00118-4 // Journal of Fluids and Structures. – 2003. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 275–286. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0889974602001184?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).
19. **Scolan, Y.** Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem / Y. Scolan, A. Korobkin. – DOI 10.1016/j.crme.2012.09.006 // Comptes Rendus

dus Mekanique. – 2012. – Vol. 340, Issue 10. – Pp. 702–705. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072112001556?via%3Dihub> (дата обращения: 27.07.2020).

20. **Sysuev, V. A.** Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia / V. A. Sysuev, V. E. Saitov, V. G. Farafonov [et al.]. – DOI 10.3103/S1068367417030156 // Russian Agricultural Sciences. – 2017. – Vol. 43, Issue 3. – Pp. 273–276. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068367417030156> (дата обращения: 27.07.2020).

21. **Сысуев, В. А.** Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи / В. А. Сысуев, В. Е. Сaitов, В. Г. Фарафоноф [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264 // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 2. – С. 248–264. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/82-19-2/701-10-15507-0236-2910-029-201902-7> (дата обращения: 27.07.2020). – Рез. англ.

Поступила 02.02.2020; принята к публикации 16.04.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Сaitов Виктор Ефимович, старший научный сотрудник лаборатории механизации полеводства ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), профессор кафедры эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), доктор технических наук, Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

Фарафоноф Вячеслав Георгиевич, заведующий кафедрой математики и физики ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), кандидат физико-математических наук, доцент, Researcher ID: B-7341-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>, farwg@mail.ru

Сaitов Алексей Викторович, аспирант инженерного факультета ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexseysaitov@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. Е. Сaitов – формулирование основной концепции исследования, подготовка первоначального варианта текста и формирование выводов; В. Г. Фарафоноф – проведение теоретических исследований погружения зерна в жидкость и доработка текста; А. В. Сaitов – обзор и анализ научных источников, оформление графического материала и списка использованной литературы.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvesters. *Research in Agricultural Engineering*. 2018; 64(4):209-214. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>
2. Aldoshin N., Didmanidze O., Lylin N., et al. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester. *Engineering for Rural Development: Proceedings of 18th International Scientific Conference*. 2019: 18:100-104. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110>
3. Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S., et al. Increasing Spread of Claviceps Purpurea (Fr). Tul. and It's Effect on the Quantity and Quality of Winter Rye. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2016; 7(3):1865-1871. Available at: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7\(3\)/\[227\].pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/[227].pdf) (accessed 27.07.2020). (In Eng.)

4. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M. Some Ways and Means of Ergot Protection of Winter Rye. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AIC*. 2014; (3):47-50. Available at: <http://agroaprk.ru/28-archive/03-2014/187-2014-03-15-ru> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
5. Khaziev A.Z., Ponomareva M.L. Damage from Ergot on Winter Rye and Measures for Preventing. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Kazan State Agrarian University Bulletin*. 2007; 2(2):80-82. Available at: https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462 (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
6. Shchekleina L.M. Influence of Weather Factors on Separate Periods of Fungus *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul Development and Level of Ergot Harmfulness in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka = Agrarian Science of Euro-North-East*. 2019; (20):134-143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143>
7. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. The Problem of Ergot Grains (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): Past and Present (Review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya = Theoretical and Applied Ecology*. 2013; (1):5-12. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
8. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M. The Dependence of the Harmfulness of Ergot on the Biometric Indicators of *Sclerotia*. *Zashchita i karantin rasteniy = Plant Protection and Quarantine*. 2017; (11):9-12 (In Russ.)
9. 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; 42(4):37–40. (In Eng.)
10. Savinyh P., Sychugov Y., Kazakov V., et al. Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain. In: *Proceedings of 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*. 2018. Pp. 124-130. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>
11. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines. *Procedia Engineering*. 2016; 150:107-110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
12. Gievsky A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., et al. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042035. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
13. Drincha V.M., Borisenko I.B. Application and Functionality of Pneumatic Sorting Tables. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal = Scientific and Agronomical Journal*. 2008; (2):33-36. (In Russ.)
14. Shaforostov V.D. Priporov I.E. Quality Indicators of Work of the Photoseparator on Fractional Technologies at Division of Sunflower Seed. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal = International Research Journal*. 2015; (1):23-25. Available at: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-tekhnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika/> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
15. Machine to Separate Ergot from Rye Seeds: Patent 2667066 Russian Federation. No. 2017115170/03; appl. 27.04.2017; publ. 18.09.2018. Bulletin No. 26. 10 p. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2667066C1_20180918 (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
16. Machine to Separate Ergot from Rye Seeds: Patent 2689470 Russian Federation. No. 2018136461/03; appl. 15.10.2018; publ. 28.05.2019. Available at: <https://findpatent.ru/patent/268/2689470.html> (accessed 27.07.2020). (In Russ.)
17. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body Drop into a Fluid Tank and Dynamic Loads Calculation. *Vestnik MGSU*. 2014; (5):135-143. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143>
18. Scolan Y., Korobkin A. Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid. *Journal of Fluids and Structures*. 2003; 17(2):275-286. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4)
19. Scolan Y., Korobkin A. Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012; 340(10):702-705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006>

20. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>

21. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Investigation of Grain Movement Parameters in the Liquid of the Device for Removing Ergot. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(2):248-264. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.248-264>

Received 02.02.2020; revised 16.04.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Viktor E. Saitov, Senior Researcher of Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russia), Professor of Machine Park Operation and Repair Chair, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), D.Sc. (Engineering), Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

Vyacheslav G. Farafonov, Head of Chair of Mathematics and Physics, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), Ph.D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Researcher ID: B-7341-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>, farwg@mail.ru

Aleksey V. Saitov, Postgraduate Student of Engineering Faculty, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexseysaitov@yandex.ru

Contribution of the authors:

V. E. Saitov – formulation of the basic concept of the study, writing the draft and drawing conclusions; V. G. Farafonov – theoretical studies of grain immersion in liquid and text editing; A. V. Saitov – review and analysis of scientific sources, graphic design and list of literature.

All authors have read and approved the final manuscript.