

# ТЕХНОЛОГИИ И СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА / TECHNOLOGIES AND MEANS OF AGRICULTURAL MECHANIZATION

УДК 631.362.3

DOI: 10.15507/2658-4123.029.201902.248-264



## Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи

В. А. Сысуюв<sup>1</sup>, В. Е. Саитов<sup>1\*</sup>, В. Г. Фарафонов<sup>2</sup>,  
А. В. Саитов<sup>2</sup>

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

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

\*vicsait-valita@e-kirov.ru

*Введение.* При уборке зерновых культур в бункер комбайна кроме зерна поступают также различные сорные и вредные примеси. К вредным примесям относятся ядовитые склероции спорыньи. Различные современные зерноочистительные машины не обеспечивают полного отделения склероциев спорыньи от зерен вследствие близости линейных размеров (ширины, толщины и длины) и скорости витания склероциев и зерен. Очистка семян от склероциев спорыньи, имеющих меньшую плотность, чем у зерна, возможна в водном растворе соли. Для механизации выделения склероциев спорыньи из семян ржи мокрым способом актуальным вопросом является разработка устройства очистки зернового материала.

*Материалы и методы.* Исследуется погружение отдельно взятых зерен ржи в воду (плотность  $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и водные растворы хлористого натрия (NaCl) плотностью  $1,09 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. За геометрическую модель зерновки принимается эллипсоид. Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики при плотности зерна  $\rho_z$  от  $1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, длине  $l_z$  от  $5,0 \cdot 10^{-3}$  м до  $10,0 \cdot 10^{-3}$  м, ширине  $b$  от  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,6 \cdot 10^{-3}$  м и толщине  $\delta$  от  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м. Для проведения практических опытов использовано зерно озимой ржи сорта Фаленская 4 плотностью  $\rho_z$  от  $1,1 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, длиной  $l_z$  от  $5,0 \cdot 10^{-3}$  м до  $8,0 \cdot 10^{-3}$  м, шириной  $b$  от  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,6 \cdot 10^{-3}$  м и толщиной  $\delta$  от  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,5 \cdot 10^{-3}$  м.

*Результаты исследования.* Скорость  $v_z$  и длительность  $t_n$  погружения зерна в жидкость являются одними из основных параметров, учитываемых при разработке машины очистки зернового материала мокрым способом от склероциев спорыньи. Значения данных величин определяют конструктивно-технологические параметры обрабатываемой машины. Для определения данных параметров необходимо учесть геометрические формы зерновок, которые обладают значительным многообразием. В качестве формы, наиболее близкой к форме зерновки, предлагается эллипсоид

© Сысуюв В. А., Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов А. В., 2019



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

с малой  $2c_z = \delta$ , средней  $2b_z = b$  и большой  $2a_z = l_z$  осями. Из основного закона динамики движения зерновки в жидкостях различной плотности ( $\rho_{zh}$ ) получена формула для определения скорости, расчетные значения которой согласуются с полученными экспериментальными данными.

*Обсуждение и заключение.* Установлено, что расчетные значения скоростей погружения зерна в жидкости различной плотности имеют один порядок с экспериментальными значениями: они отличаются не более чем на 10 %. Данный подход к определению скорости погружения зерна в жидкость можно использовать при разработке машины очистки зернового материала по плотности мокрым способом для обоснования ее конструктивно-технологических параметров.

**Ключевые слова:** очистка зерна, мокрый способ очистки зерна, эллипсоидальная зерновка, водный раствор соли, скорость погружения зерновки в жидкость

*Для цитирования:* Исследование параметров движения зерна в жидкости устройства для удаления спорыньи / В. А. Сысоев [и др.] // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29, № 2. С. 248–264. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.248-264>

## Investigation of Grain Movement Parameters in the Liquid of the Device for Removing Ergot

V. A. Sysuev<sup>1</sup>, V. E. Saitov<sup>1\*</sup>, V. G. Farafonov<sup>2</sup>, A. V. Saitov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (Kirov, Russia)

<sup>2</sup>Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russia)

\*[vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru)

*Introduction.* When harvesting grain crops, various trash and harmful impurities come to the combine bunker together with grains. These harmful impurities include ergot sclerotia, which are poisonous. Various modern grain cleaning machines do not provide for complete separation of ergot sclerotia from grains, because of the closeness of their linear dimensions (width, thickness and length) and speed of soaring. Cleaning seeds from ergot sclerotia having the density less than density of grain, is possible in an aqueous solution of salt. For the mechanization of the allocation of sclerotium ergot from rye seeds by a wet method, the urgent issue is the development of a device for cleaning grain material.

*Materials and Methods.* The immersion of separately taken rye grains in water ( $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) and aqueous solutions of sodium chloride (NaCl) with density  $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  and  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ . The ellipsoid is taken as the geometric model of the grains. Theoretical studies were performed for the grain density  $\rho_z$  from  $1,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  to  $1,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , lengths  $l_z$  from  $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $10,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , widths  $b$  from  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  and thickness  $\delta$  from  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  based on the methods of mathematical modelling using the laws of hydrodynamics. For practical experiments, there was chosen the gains of the winter rye variety Falenskaya 4 having the gain density  $\rho_z$  from  $1,1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  to  $1,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , length  $l_z$  from  $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , width  $b$  from  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , and thickness  $\delta$  from  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  to  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

*Results.* The speed  $v_z$  and duration  $t_n$  of grain immersion in liquids are main parameters taken into account when developing a machine for cleaning the grain material from ergot sclerotia with a wet method. The values of these quantities determine the structural and technological parameters of the machine under developing. To determine these parameters, it is necessary to take into account the geometric shapes of the grains, which have a large variety. An ellipsoid with a small  $2c_z = \delta$ , an average  $2b_z = b$  and a large  $2a_z = l_z$  axes is proposed as the closest to the shape of the grain. From the basic law of the dynamics of the grain movement in liquids of various densities  $\rho_{zh}$ , a formula was obtained for determining its velocity, the calculated values for which are consistent with the experimental data obtained.

*Discussion and Conclusion.* It is established that the calculated values of the speed of grain immersion in liquids of different density are comparable with the experimental values of the same order. They are close and differ by no more than 10 %. This approach to determining the speed of grain immersion in a liquid can be used in developing a machine for cleaning a grain material with the wet method to substantiate its structural and technological parameters.

**Keywords:** grain cleaning, wet method of cleaning grains, ellipsoidal caryopsis, aqueous solution of salt, speed of grain immersion in liquid

**For citation:** Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. 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. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.248-264>

## Введение

С древнейших времен зерно использовалось людьми для приготовления пищи. Впоследствии с увеличением урожайности зерновых культур за счет применения агротехники и, следовательно, с ростом производства зерно стало применяться также в качестве необходимого корма для сельскохозяйственных животных с целью повышения их продуктивности<sup>1</sup>.

В настоящее время технология производства зерна в достаточной степени механизирована и предусматривает применение различных сельскохозяйственных машин. Поступающая с полей от зерноуборочных комбайнов на пункты и комплексы послеуборочной обработки бункерная зерновая масса кроме полного зерна содержит зерновую примесь, а также различные сорные и вредные примеси, что обусловлено невозможностью полной очистки обмолачиваемой хлебной массы молотилкой комбайна [1].

К зерновой примеси относятся мелкие, щуплые или битые и поврежденные молотилкой комбайна зерна основной культуры, а также зерна других сельскохозяйственных культур. Зерновая примесь после соответствующей переработки является ценным продук-

том для вскармливания сельскохозяйственных животных [Там же].

В бункерной зерновой массе могут также содержаться песок, комки земли, галька и камешки, которые попадают туда в основном при подборе хлебной массы из валков, лежащих на поверхности поля, и подаче ее на платформу жатки комбайна. Подобные компоненты бункерной зерновой массы относятся к минеральным примесям и могут оказывать болезненное влияние на желудочно-кишечный тракт людей и животных. Полова, частицы листьев, стержней, стеблей, колоса и соцветий различных растений и трав также не могут быть полностью удалены из бункерной зерновой массы в процессе очистки комбайном. Данные органические примеси также ухудшают качество зерна и изменяют цвет, вкус и запах продуктов его переработки [1].

К вредной примеси относятся ядовитые семена вязеля, горчака, мышатника, плевела, куколя и других ядовитых растений, а также паразитические грибки, в том числе склероции (рожки) спорыньи, мешочки и споры головни [2–6].

Спорами спорыньи часто заражаются основные злаковые культуры (рожь, пшеница, овес и ячмень). Степень пора-

<sup>1</sup> Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.; Энергия ржи для здоровья человека / В. А. Сысуйев [и др.]. Киров : НИИСХ Северо-Востока, 2010. 103 с.

жения особенно возрастает во влажные годы. В период созревания колосьев данных культур вместо зерен образуются склероции (рожки), по форме схожие с зерном. Склероции спорыньи достаточно ядовиты даже при небольшой их концентрации в готовом продукте. При употреблении такого продукта происходит отравление, признаками которого являются головокружение, слабость, судороги и наркотические галлюцинации. Результатом постоянного употребления хлеба, зараженного спорыньей, является развитие гангрены конечностей у человека и животных. Попадание значительной дозы яда спорыньи в организм может привести к летальному исходу в результате паралича дыхательного центра [2; 4].

Таким образом, очистка бункерной зерновой массы от всех примесей, в особенности вредных, является первоочередной задачей сельскохозяйственного производителя для получения элитного посевного материала, экологически чистого продовольственного и фуражного зерна.

Для очистки бункерной зерновой массы от примесей в технологической линии зерноочистительного пункта или комплекса применяют сложные по конструкции и технологическим регулировкам воздушно-решетные машины предварительной и первичной очистки, на конечной стадии – воздушно-решетно-триерные машины, а для извлечения трудноотделимых сорных примесей – специальные машины. Существующие зерноочистительные устройства в ходе одного технологического процесса не обеспечивают полного выделения всех зерновых и сорных примесей, в том числе и склероциев спорыньи<sup>2</sup> [1; 7].

Целью статьи является создание несложного по конструкции устройства для удаления склероциев спорыньи из зерна в ходе одного технологического

процесса при снижении энергоемкости работы.

### Обзор литературы

Анализ научно-технической литературы показал, что существующие конструкции машин для послеуборочной очистки не обеспечивают полного выделения из зерна различных примесей, в том числе ядовитых склероциев спорыньи, поскольку линейные размеры (ширина, толщина и длина) и аэродинамические свойства (скорость витания) данных примесей вследствие мутаций приблизились к параметрам зерен основной культуры или сравнялись с ними. Так, зерна ржи, пшеницы, ячменя, овса имеют скорость витания  $v_{vit}$  от 7,0 м/с до 11,5 м/с, толщину  $\delta$  от  $1,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $4,5 \cdot 10^{-3}$  м, ширину  $b$  от  $1,4 \cdot 10^{-3}$  м до  $5,0 \cdot 10^{-3}$  м и длину  $l_z$  от  $4,2 \cdot 10^{-3}$  м до  $18,6 \cdot 10^{-3}$  м. У склероциев спорыньи скорость витания  $v_{vit}$  составляет от 4,5 м/с до 9,6 м/с, толщина  $\delta$  – от  $0,8 \cdot 10^{-3}$  м до  $1,8 \cdot 10^{-3}$  м, ширина  $b$  – от  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м до  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м, длина  $l_z$  – от  $3,4 \cdot 10^{-3}$  м до  $14,6 \cdot 10^{-3}$  м [7–11].

Для очистки различных сыпучих материалов (в том числе зерна) от примесей разработаны фотоэлектронные сепараторы на основе инновационных технологий. Процесс очистки в них заключается в скоростном фотосканировании зернового потока, ускоренно движущегося по наклонному лотку, и удалении некондиционных компонентов, цвет которых не соответствует цвету очищаемого зерна, воздушным импульсом узкого сжатого воздуха. Однако при получении в ходе одного технологического процесса очистки зерна, соответствующего агротехническим требованиям, в отходы отправляется значительное количество полновесного зерна. Для снижения подобных потерь фракция отходов должна направляться на очистку вторично. Это обуславливает снижение производительности, возрастание энер-

<sup>2</sup> Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.

гоемкости рабочего процесса фотосепаратора и увеличение количества зерна, травмированного необходимыми транспортирующими органами. Также следует отметить, что склероции (рожки) спорыньи зачастую мутируют и подстраиваются под цвет зерна основной культуры. Поэтому современные фотоэлектронные сепараторы, очищающие зерновой материал по способу разности цветов примесей и зерна, не способны выделять ядовитые склероции спорыньи, схожие по цвету с зерном основной культуры. К тому же фотосепаратор является достаточно сложным оборудованием, его стоимость достигает нескольких миллионов рублей, а время эксплуатации производитель ограничивает лишь пятью годами. При этом эксплуатация таких машин должна осуществляться в беспыльном помещении с температурой воздуха 25 °С. Следовательно, большинство сельскохозяйственных предприятий не имеет финансовых возможностей для приобретения и эксплуатации фотосепараторов, поэтому требуется дальнейший поиск способа отделения склероциев спорыньи от зерна основной культуры [12; 13].

Зерна основных зерновых культур (ржи, пшеницы, ячменя, овса) имеют большую плотность  $\rho_z$  (от  $1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), чем склероции (рожки) спорыньи ( $\rho_s$  составляет от  $0,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> до  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>). Поэтому практически 100-процентная очистка зерна, предназначенного для пищевых и семенных целей, от ядовитых склероциев спорыньи в ходе одного технологического процесса возможна в водных растворах различных неорганических солей (например, в растворе поваренной или калийной соли). Пребывание семян ржи в вод-

ном растворе калийной соли обогащает их калием и очищает от вредных микроорганизмов, что повышает процент и скорость всхожести, улучшает соломистость зерновой культуры, снижает ее полеглость и, следовательно, увеличивает урожайность при работе зерноуборочных комбайнов<sup>3</sup>.

Мокрый способ очистки зерна от ядовитых примесей также может использоваться для протравливания семян перед посевом. Способ мокрого протравливания по сравнению с сухим и мелкодисперсным способами обеспечивает более глубокое и полное обеззараживание семян, при этом не происходит загрязнения воздуха. Преимущества данного метода заключаются в его высокой биологической эффективности против широкого спектра заболеваний за счет обработки всей поверхности семян и активации их прорастания путем увеличения влажности семени [3; 5].

При закладке на хранение семян, очищенных мокрым способом, удаление лишней влаги с поверхности зерен, побывавших в водном растворе соли не более минуты, происходит за 10 секунд с помощью продувки воздухом наружной температуры, что исключает применение сложных и энергоемких сушильных агрегатов<sup>4</sup> [1].

Поэтому для механизации выделения ядовитых склероциев спорыньи из семян зерновых культур мокрым способом актуальной задачей является разработка несложного по конструкции устройства для очистки зернового материала при малой энергоемкости технологического процесса (в сравнении с существующими зерноочистительными машинами). Следовательно, при разработке такой машины очистки зернового материала по плотности мокрым

<sup>3</sup> Волков А. И., Жарский И. М. Большой химический справочник. Минск : Современная школа, 2005. 608 с.; Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1972. 256 с.

<sup>4</sup> Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов [и др.]. Ростов н/Д : МарТ, 2001. 229 с.; Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1972. 256 с.

способом и выполнении ею процесса выделения ядовитых склероциев спорыньи с надлежащей эффективностью требуется обоснование ее конструктивно-технологических параметров, для чего необходимо исследование показателей движения зерновок в жидкостях различной плотности.

### Материалы и методы

Рассматривается движение отдельных взятых зерен ржи в жидкостях различной плотности устройства для отделения спорыньи от зерна мокрым способом. Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики.

При проведении практических экспериментов<sup>5</sup> исследовалось движение в воде (плотность  $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) и водных растворах хлористого натрия NaCl (плотность  $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) зерен озимой ржи сорта Фаленская 4 плотностью  $\rho_z$  от  $1,1 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  до  $1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , длиной  $l_z$  от  $5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $8,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , шириной  $b$

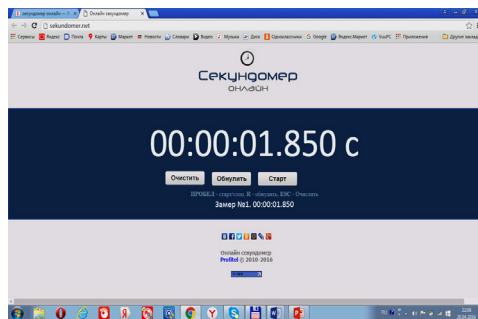
от  $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и толщиной  $\delta$  от  $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  до  $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  [1; 14].

Для этого использован прозрачный стеклянный сосуд, имеющий длину 0,35 м, ширину 0,20 м и высоту 0,15 м. Объем налитой в него воды составлял 9,6 л. За высоту  $h_{н1}$  столба воды или водного раствора соли в нем принято значение 0,135 м между метками. Метки располагались на расстоянии 0,01 м от верхней кромки жидкости и от дна сосуда (рис. 1).

Высота  $h$  падения зерновок в воду или водные растворы соли обеспечивалась при помощи набора металлических пластин, устанавливаемых над сосудом. Каждая пластина имела толщину  $1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , длину 0,28 м и ширину 0,04 м. Зерновки в количестве 20 штук устанавливались на пластинку и сбрасывались в воду или в водный раствор соли с высоты  $h = 0,050 \text{ м}$ , при которой происходило 100-процентное преодоление поверхностного натяжения жидкости зерновками без захвата пузырьков воздуха и погружение их в жидкость<sup>6</sup> [15].



a)



b)

Р и с. 1. Экспериментальная установка для исследования погружения зерна в жидкость:  
а) стеклянный сосуд с установленными на нем металлическими пластинами;  
б) компьютерный секундомер

F i g. 1. The experimental unit for studying grain immersion in liquid:  
a) glass vessel with metal plates mounted on it; b) computer stopwatch

<sup>5</sup> Павловский Г. Т., Птицын С. Д. Очистка, сушка и активное вентилирование зерна. – 2-е изд., испр. и доп. М. : Высшая школа, 1972. 256 с.

<sup>6</sup> Саитов В. Е., Фарафонов В. Г., Саитов 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 : мат-лы междунар. науч.-практ. конф. Йошкар-Ола : Мар. гос. ун-т, 2016. Вып. XVIII. С. 241–244. URL: [https://www.marsu.ru/units/ati/doc/mosolovskie\\_chteniya/18\\_mosolovskie\\_chteniya\\_2016.pdf](https://www.marsu.ru/units/ati/doc/mosolovskie_chteniya/18_mosolovskie_chteniya_2016.pdf)

Геометрические параметры прозрачного стеклянного сосуда, высоту  $h_{n1}$  столба воды или водного раствора соли между метками, а также высоту  $h$  сбрасывания зерновки в воду или в водный раствор соли измеряли при помощи линейки с миллиметровым делением. Время  $t_n$  движения зерновки в воде или водном растворе соли между метками определяли при помощи компьютерного секундомера; оно отображалось на экране до тысячных долей секунды. Процесс движения зерновки в жидкости и показания секундомера фиксировались с помощью видеосъемки телефоном OnePlus 3T с частотой 120 кадров в секунду и просматривались покадрово. В результате время падения зерновки между метками столба жидкости определялось с точностью до 0,02 с с учетом фиксации двух кадров, соответствующих касанию зерновкой двух меток.

Относительную погрешность  $\delta_z$  скорости погружения зерновки в жидкость в опытах оценивали из соотношения<sup>7</sup>:

$$\delta_z = \frac{\Delta v_z}{v_{z, sr\,exper.}} = \frac{\Delta t_z}{t_{z, sr}} + \frac{\Delta h_{n1}}{h_{n1}}, \quad (1)$$

где  $\Delta v_z$  – абсолютная погрешность определения скорости погружения зерновки в жидкость, м/с;  $v_{z, sr\,exper.}$  – средняя скорость погружения зерновки в жидкость (по результатам предварительных экспериментов  $v_{z, sr\,exper.} \leq 0,10$  м/с);  $\Delta t_z$  – абсолютная погрешность определения времени падения зерновки в жидкости ( $\Delta t_z = 0,02$  с);  $t_{z, sr}$  – среднее время падения зерновки в жидкости в опытах ( $t_{z, sr} > 1,0$  с);  $\Delta h_{n1}$  – абсолютная погрешность определения высоты столба жидкости (половина цены деления линейки;  $\Delta h_{n1} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м).

Тогда относительная погрешность  $\delta_z$  определения скорости погружения зерновки в жидкость в опытах, согласно выражению (1), составляет 0,02.

Оценка сверху абсолютной погрешности  $\Delta v_z$  скорости погружения зерновки в жидкость, определяемая по формуле

$$\Delta v_z = \delta_z \cdot v_{z, sr\,exper.} \quad (2)$$

согласно вышеприведенным данным, равна 0,002 м/с. Поэтому результаты по скорости падения зерновки в жидкость были в последующих расчетах выполнены в соответствии с данной точностью.

Обработка полученных теоретических и экспериментальных данных проведена на персональном компьютере при помощи пакета программ офисной документации по статистической обработке информации Microsoft Excel 2013 и специальной программы по статистической обработке данных Sigma Plot 8.0<sup>8</sup>.

### Результаты исследования

Скорость  $v_z$  и длительность  $t_n$  погружения зерна в жидкость являются одними из основных параметров, учитываемых при разработке машины для очистки зернового материала от склероциев спорыньи мокрым способом. Значения данных величин определяют конструктивно-технологические параметры разрабатываемого устройства.

Для определения данных параметров необходимо учесть геометрические формы зерновок, которые весьма разнообразны. Наиболее близок к зерновке по форме эллипсоид с малой  $2c_z = \delta$ , средней  $2b_z = b$  и большой  $2a_z = l_z$  осями.

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что при падении зернов-

<sup>7</sup> Румшицкий Л. З. Математическая обработка результатов измерений. М. : Глав. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1971. 192 с.; Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин / Под ред. Ж. И. Алферова. Л. : Наука, 1985. 112 с.

<sup>8</sup> Леонов В. Большая энциклопедия компьютера. М. : Эксмо, 2015. 400 с.; Лебедев А. Н. Понятный самоучитель Excel 2013. СПб. : Питер, 2014. 128 с.; SigmaPlot – Scientific Data Analysis and Graphing Software. URL: <http://www.sigmaplot.co.uk/products/sigmaplot/sigmaplot-details.php>

ки на поверхность жидкости и преодолении силы поверхностного натяжения она двигается в жидкости, ориентируясь в основном плашмя вследствие асимметричности расположения в ней центра тяжести. Поэтому движение в жидкости эллипсоидальной зерновки рассматриваем вдоль малой оси  $2c_z$  (плашмя).

Общий вид навески зерен озимой ржи сорта Фаленская 4 и схема сил, действующих на зерновку при движении в жидкости, приведены на рис. 2.

После падения зерновки на поверхность жидкости и преодоления поверхностного натяжения на нее будут действовать сила тяжести  $m_z \vec{g}$ , сила Архимеда  $\vec{F}_A$  и сила гидродинамического сопротивления  $\vec{F}_C$ .

Основной закон динамики движения зерновки вдоль оси  $y$  имеет вид<sup>9</sup>:

$$m_z g - F_A - F_C = m_z a, \quad (3)$$



а)

где  $m_z$  – масса зерновки, кг;  $g$  – ускорение свободного падения ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );  $a$  – ускорение зерновки при ее движении в жидкости,  $\text{м/с}^2$ .

Масса эллипсоидальной зерновки будет равна<sup>10</sup>:

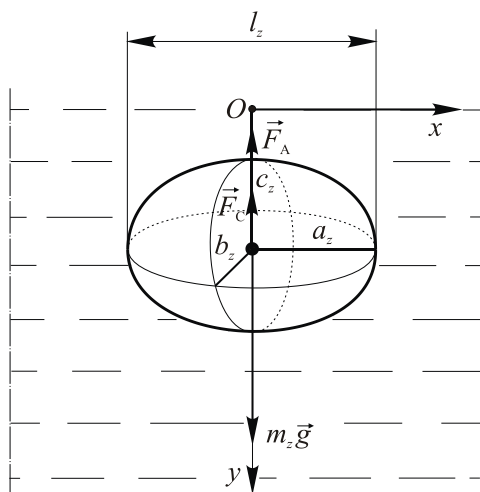
$$m_z = V_z \rho_z = \frac{4}{3} \pi a_z b_z c_z \rho_z, \quad (4)$$

где  $V_z$  – объем зерновки,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_z$  – плотность массы зерновки,  $\text{кг/м}^3$ .

Сила Архимеда  $F_A$ , выталкивающая зерновку из жидкости, выражается следующим образом:

$$F_A = m_{zh} g = \frac{4}{3} \pi a_z b_z c_z \rho_{zh} g, \quad (5)$$

где  $m_{zh}$  – масса жидкости, вытесняемая зерновкой, кг;  $\rho_{zh}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .



б)

Р и с. 2. Озимая рожь сорта Фаленская 4: а) общий вид навески зерен; б) схема сил, действующих на зерновку при погружении ее в жидкость

Fig. 2. The variety of the winter rye Falenskaya 4: a) the general view of the weighed portion of grains; b) the diagram of the forces acting on grains when immersing in liquid

<sup>9</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М. : Физматлит, 2001. 736 с.; Седов Л. И. Механика сплошной среды : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. – 6-е изд., стер. СПб. : Лань, 2004. 560 с.

<sup>10</sup> Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М. : Наука, 1980. 976 с.



Сила гидродинамического сопротивления  $F_C$ , действующая со стороны жидкости на зерновку, определяется по формуле<sup>11</sup>:

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

где  $c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления, зависящий от геометрической формы зерновки, скорости ее движения в жидкости и вязкости жидкости;  $S$  – площадь проекции зерновки на плоскость, перпендикулярную направлению ее движения (миделевое сечение),  $m^2$ .

При движении зерновки в жидкости вдоль малой оси  $2c_z$  эллипсоида (плашмя) площадь миделевого сечения (эллипса) равна<sup>12</sup>:

$$S = \pi a_z b_z. \quad (7)$$

Тогда уравнение (3) с учетом (4–7) примет вид:

$$\frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_z g - \frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_{zh} g - \frac{c\pi a_z b_z \rho_{zh} v_z^2}{2} = \frac{4}{3}\pi a_z b_z c_z \rho_z a. \quad (8)$$

Выразим ускорение  $a$  зерновки из уравнения (8):

$$a = \frac{g(\rho_z - \rho_{zh})}{\rho_z} - \frac{3c\rho_{zh}}{8c_z\rho_z} \cdot v_z^2. \quad (9)$$

Введем следующие обозначения:

$$b^2 = \frac{g(\rho_z - \rho_{zh})}{\rho_z}, \quad d^2 = \frac{3c\rho_{zh}}{8c_z\rho_z}. \quad (10)$$

С учетом обозначений (10) получим выражение для определения ускорения зерновки при ее движении в жидкости после преодоления поверхностного натяжения:

$$a = \frac{dv}{dt} = b^2 - d^2v^2, \quad (11)$$

где  $v$  – скорость движения зерновки в жидкости как функция времени  $t$ , м/с;  $t$  – текущее время, с.

Скорость  $v$  движения зерновки в жидкости находим интегрированием дифференциального уравнения (11):

$$\int dt = t = \int \frac{dv}{b^2 - d^2v^2} = \frac{1}{2bd} \ln \left| \frac{\frac{b}{d} + v}{\frac{b}{d} - v} \right| + C_1, \quad (12)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования.

Полагаем, что после падения зерновки и преодоления ею поверхностного натяжения жидкости ее скорость будет нулевой ( $v(0) = 0$ ), что предотвращает захват зерновкой пузырька воздуха. Тогда постоянная интегрирования  $C_1 = 0$ . После введения обозначений

$$\tau = \frac{1}{2bd} = \sqrt{\frac{2c_z\rho_z^2}{3c g \rho_{zh}(\rho_z - \rho_{zh})}}, \quad (13)$$

$$v_0 = \frac{b}{d} = \sqrt{\frac{8c_z g(\rho_z - \rho_{zh})}{3c\rho_{zh}}} \quad (14)$$

и преобразований уравнения (12) получим:

<sup>11</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов : в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М. : Физматлит, 2001. 736 с.; Курс физики : учеб. пособ. Т. 1. Механика. Акустика. Теплота и молекулярная физика / Сост. Н. Н. Андреев, С. Н. Ржевкин, Г. С. Горелик ; ред. Н. Д. Папалекси. М. : Гостехиздат, 1948. 600 с.

<sup>12</sup> Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. М. : Наука, 1980. 976 с.

$$\ln \left| \frac{v_0 + v}{v_0 - v} \right| = \frac{t}{\tau}, \quad (15)$$

где  $v_0$  – скорость зерновки, к которой после преодоления поверхностного натяжения жидкости стремится скорость  $v$  (с ней в дальнейшем зерновка будет двигаться в жидкости), м/с;  $\tau$  – параметр, определяющий время движения зерновки с момента преодоления поверхностного натяжения жидкости до установления постоянной скорости  $v_0$ , с.

Время  $\tau$  является характерным временем для ускоренного или замедленного (если скорость зерновки после преодоления поверхностного натяжения жидкости будет больше  $v_0$ ) движения каждой зерновки и определяется геометрической формой и физико-механическими свойствами зерновки ( $\rho_z$ ,  $c_z$ ), плотностью жидкости  $\rho_{zh}$ , коэффициентом  $c$  гидродинамического сопротивления жидкости.

Скорость  $v$  зерновки в жидкости будет возрастать от нуля до  $v_0$ , поэтому модуль в уравнении (15) при его преобразовании можно отбросить; тогда

$$v = \frac{dy}{dt} = v_0 \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1}. \quad (16)$$

Интегрируем дифференциальное уравнение (16):

$$\int_0^{h_1} dy = v_0 \int_0^{t_1} \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1} dt, \quad (17)$$

где  $h_1$  – текущее расстояние, пройденное зерновкой в жидкости, м;  $t_1$  – время,

за которое зерновка проходит расстояние  $h_1$ , с.

Получим зависимость расстояния  $h_1$ , пройденного зерновкой в жидкости, от затраченного на это времени  $t_1$ :

$$h_1 = v_0 \left( 2\tau \ln(e^{\frac{t_1}{\tau}} + 1) - t_1 \right). \quad (18)$$

Заменяя в уравнении (18) расстояние  $h_1$  на высоту столба жидкости  $h_n$  в ванне машины выделения склероциев спорыньи, а  $t_1$  – на время погружения зерновки  $t_n$  в жидкость от момента преодоления поверхностного натяжения до дна ванны, получим выражение:

$$2\tau \ln \left( e^{\frac{t_n}{\tau}} + 1 \right) - t_n = \frac{h_n}{v_0}. \quad (19)$$

Уравнение (19) дает зависимость времени погружения зерновки  $t_n$  до дна от высоты столба жидкости  $h_n$  в ванне.

Найдем значение времени  $\tau$  из выражения (13) для промежуточных значений физико-механических свойств зерновки ( $c_{z, sr} = 1,17 \cdot 10^{-3}$  м,  $\rho_{z, sr} = 1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и жидкости ( $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), а также от коэффициента  $c = 0,9$  гидродинамического сопротивления<sup>13</sup> [15], которое составит 0,02 с.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что если время погружения зерновки в жидкость до дна ванны машины для выделения склероциев спорыньи составляет больше одной секунды, то  $\frac{t_n}{\tau} \gg 1$  и, следо-

вательно,  $e^{\frac{t_n}{\tau}} \gg 1$ ; тогда уравнение (19) примет вид:

<sup>13</sup> Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : справ. пособ. М. : Энергоатомиздат, 1990. 367 с.; Идельчик И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. (Подвод, отвод и распределение потока по сечению аппаратов). М. : Машиностроение, 1983. 351 с.; Справочник по гидравлическим расчетам. – 5-е изд., перераб. и доп. / П. Г. Киселев [и др.] ; под ред. П. Г. Киселева. М. : Энергия, 1974. 312 с. URL: [http://books.totalarch.com/handbook\\_of\\_hydraulic\\_calculations](http://books.totalarch.com/handbook_of_hydraulic_calculations)

$$2\tau \cdot \frac{t_n - t_n}{\tau} = \frac{h_n}{v_0} \quad \text{или}$$

$$t_n = \frac{h_n}{v_0}. \quad (20)$$

С точки зрения проектирования и создания машины для выделения склероциев спорыньи из зерна ржи важно знать время  $t_0$  (время переходного процесса), за которое зерновка достигнет постоянного значения скорости  $v_0$ . Как принято в исследованиях по физике<sup>14</sup>, это время  $t_0$  достижения скоростью  $v$  зерновки  $(1 - \frac{1}{e})$  части скорости  $v_0$  в формуле (16):

$$\frac{v_0}{e^\tau} - 1 = 1 - \frac{1}{e}.$$

$$\frac{v_0}{e^\tau + 1} = 1 - \frac{1}{e}. \quad (21)$$

После преобразования выражения (21) получим:

$$t_0 = \ln(2e - 1) \cdot \tau = 1,49\tau. \quad (22)$$

Найдем значение времени  $t_0$  переходного процесса по формуле (22) и расстояние  $h_0$ , на котором происходит этот процесс, из выражения (18). Для  $\tau = 0,02$  с и скорости  $v_0 = 0,1$  м/с, определенной в ходе предварительных опытов, получим следующие значения:  $t_0 = 0,03$  с;  $h_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$  м.

При других возможных значениях  $c_z$ ,  $\rho_z$  и  $\rho_{zh}$  время  $t_0$  достижения постоянной скорости будет иметь тот же малый порядок; то же можно сказать и о расстоянии  $h_0$ , пройденном зерновкой в переходном процессе.

Из приведенных выше результатов следует, что время  $t_0$  и расстояние  $h_0$ , на котором происходит достижение

постоянной скорости  $v_0$ , малы в сравнении со временем  $t_n$  погружения зерновки в жидкость до дна ванны машины выделения склероциев спорыньи (оно составляет больше секунды), а высота  $h_n$  столба жидкости в ванне может достигать десятков сантиметров. Тогда скорость зерновки можно считать постоянной ( $v_0 = v_z$ ), а ускорение  $a$  в уравнении (3) – равным нулю. Следовательно, в течение всего времени  $t_n$  движения зерновки от начала погружения до падения на дно ванны ее скорость  $v_z$  можно определять по формуле (14).

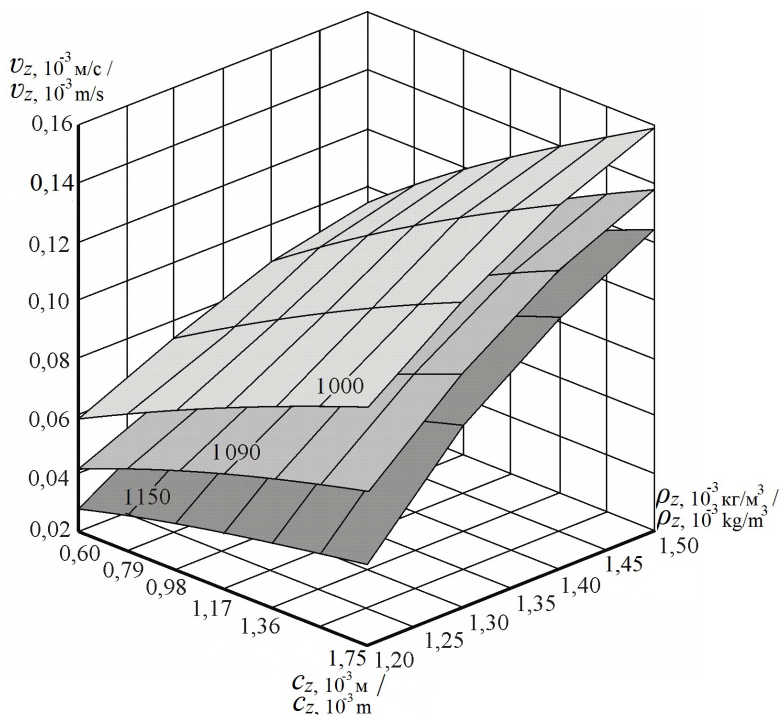
Соответствующие формуле (14) зависимости скорости  $v_z$  погружения эллипсоидальной зерновки в жидкость плотностью  $1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $1,09 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> от величины малой полуоси  $c_z$  и плотности  $\rho_z$  зерна представлены в виде поверхностей на рис. 3.

Из рис. 3 следует, что для зерновки при возрастании величины малой полуоси  $c_z$  и ее плотности  $\rho_z$  значение скорости  $v_z$  повышается. При увеличении плотности жидкости  $\rho_{zh}$  значения скорости погружения зерновок  $v_z$  уменьшаются. Это объясняется тем, что противодействующие падению зерновки сила Архимеда  $\vec{F}_A$  (5) и сила гидродинамического сопротивления  $\vec{F}_C$  (6) растут с ростом плотности жидкости  $\rho_{zh}$ .

Минимальные скорости  $v_{z \min}$  погружения зерновок в жидкость определяются при значениях параметров зерна ржи  $c_z = 0,6 \cdot 10^{-3}$  м и  $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При данных параметрах  $v_{z \min}$  составляет 0,059 м/с, 0,042 м/с и 0,028 м/с для жидкостей плотностью  $\rho_{zh}$   $1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $1,09 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> соответственно.

Максимальные скорости погружения зерновок  $v_{z \max}$  в жидкость определя-

<sup>14</sup> Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика : учеб. пособ. для вузов : в 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 5-е изд., стер. М. : Физматлит, 2001. 736 с.; Седов Л. И. Механика сплошной среды : учеб. для вузов : в 2 т. Т. 2. 6-е изд., стер. СПб. : Лань, 2004. 560 с.; Курс физики : учеб. пособ. Т. 1. Механика. Акустика. Теплота и молекулярная физика / Сост. Н. Н. Андреев, С. Н. Ржевкин, Г. С. Горелик ; ред. Н. Д. Папалекси. М. : Гостехиздат, 1948. 600 с.



Р и с. 3. Зависимости скорости  $v_z$  погружения эллипсоидальной зерновки в жидкости плотностью  $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  от величины малой полуоси  $c_z$  и плотности  $\rho_z$  зерна

Fig. 3. The dependence of the speed  $v_z$  of immersing ellipsoidal grains in the liquids with a density of  $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  and  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  on the value of the minor semiaxis  $c_z$  and density of grains  $\rho_z$

ются при значениях параметров зерна ржи  $c_z = 1,75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и  $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . При данных параметрах  $v_{z,max}$  составляет 0,159 м/с, 0,138 м/с и 0,124 м/с для жидкостей плотностью  $\rho_{zh} 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ,  $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  соответственно.

При движении в жидкости зернового материала потоком вследствие столкновения зерновок между собой их скорости будут усредняться. Для 28 пар значений малой полуоси  $c_z$  и плотности  $\rho_z$  (рис. 3) расчетное среднее арифметическое значение скорости погружения зерновок  $v_{z,sr,theor}$ , (14) в воду плотностью  $1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  составляет 0,106 м/с; в водный раствор соли плотностью  $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 0,087 и 0,072 м/с соответственно.

Результаты проведенных практических экспериментов представлены в виде зависимости скорости погружения зерновок  $v_z$  озимой ржи Фаленская 4 в воду и водные растворы хлористого натрия (NaCl) на глубину  $h_{n1} = 0,135 \text{ м}$  между метками от номера проведенного опыта  $x_{№}$  (рис. 4).

Зависимость скорости погружения зерна  $v_z$  озимой ржи сорта Фаленская 4 в воду ( $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) от номера проведенного опыта  $x_{№}$  показывает, что минимальная скорость погружения зерна  $v_{z,min,1000}$  равна 0,074 м/с, а максимальная скорость  $v_{z,max,1000}$  составляет 0,121 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок  $v_{z,sr,exper,1000}$  согласно экспериментальным данным, составляет 0,091 м/с.

Пределы варьирования скорости  $v_z$  в опытах при погружении зерен в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью  $\rho_{zh} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  составляют 0,061–0,096 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок  $v_{z, sr\text{exper.}1090}$  при данной плотности равно 0,078 м/с.

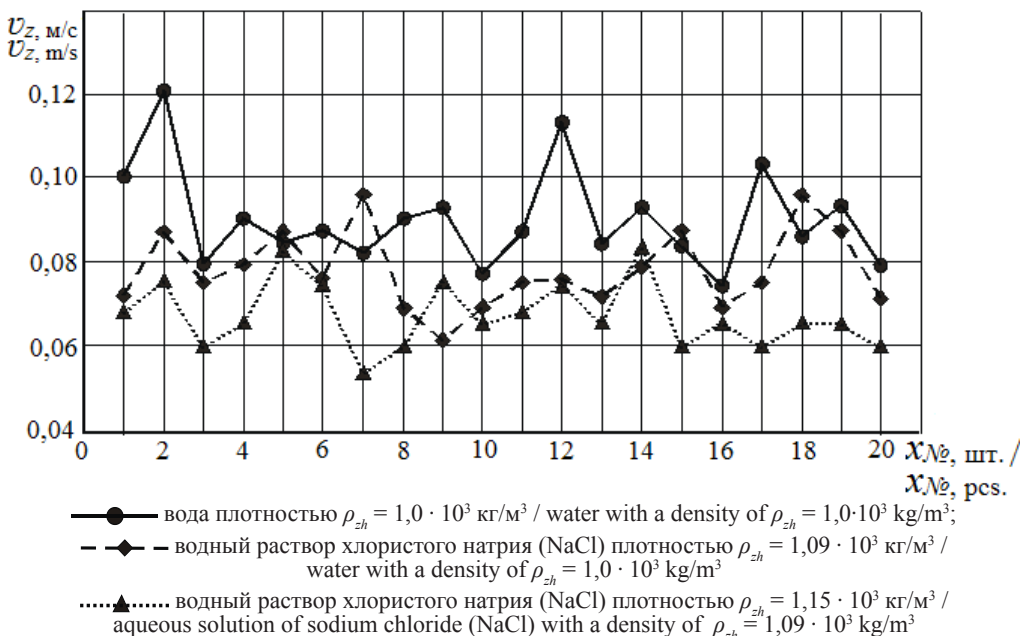
В ходе практических опытов при погружении зерен в водный раствор хлористого натрия (NaCl) плотностью  $\rho_{zh} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  выявлено, что минимальная скорость погружения зерна  $v_{z, min.1150}$  равна 0,053 м/с, а максимальная скорость  $v_{z, max.1150}$  составляет 0,083 м/с. Среднее арифметическое значение скорости зерновок  $v_{z, sr\text{exper.}1150}$  из полученных опытных данных равно 0,067 м/с.

Сопоставление значений скорости погружения зерновок в жидкости различной плотности, полученных в экспериментах и рассчитанных для эллипсоидальной модели зерновки, показало,

что они относятся к одному порядку. Относительное отличие данных скоростей в процентах, определяемое по формуле

$$\delta_{v_z} = \frac{|v_{z, sr\text{theor.}} - v_{z, sr\text{exper.}}|}{v_{z, sr\text{theor.}}} \cdot 100, \quad (23)$$

показывает, что при погружении зерновки в воду ( $\rho_{zh} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) оно составляет не более 14 %; при погружении в водные растворы хлористого натрия (NaCl) плотностью  $1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 10 % и 7 % соответственно. Относительное отличие скорости погружения зерновок в жидкости различной плотности, полученной экспериментально и теоретически, уменьшается с увеличением плотности жидкости  $\rho_{zh}$ . Это связано с тем, что зерновки имеют неосесимметричную геометрическую форму, поэтому многие зерновки погружаются по волнистой



Р и с. 4. Зависимость скорости  $v_z$  погружения зерновок озимой ржи сорта Фаленская 4 в воду и водные растворы хлористого натрия (NaCl) от номера  $x_{Nz}$  проведенного опыта

F i g. 4. The dependence of the speed  $v_z$  of immersing the grains of the variety of the winter rye Falenskaya 4 in water and in an aqueous solution of sodium chloride (NaCl) on the number  $x_{Nz}$  of the experiment

траектории. Скорость зерновки при волнистой траектории имеет вертикальную и горизонтальную составляющие. В горизонтальном направлении движению зерновки противодействует только сила гидродинамического сопротивления  $\vec{F}_C$  (6), которая возрастает с увеличением плотности жидкости  $\rho_{zh}$ . Это приводит к уменьшению амплитуды волнистой траектории и приближению ее длины к длине теоретической прямой траектории и, следовательно, к приближению скорости падения зерновки в эксперименте к теоретически рассчитанной скорости и уменьшению относительного отличия данных скоростей в процентах при увеличении плотности жидкости  $\rho_{zh}$ .

В устройствах для удаления спорыньи из ржи должно осуществляться погружение зерна в водные растворы неорганических солей. Как показано в статье, в таком случае относительное отличие скоростей составляет не более 10 %. Это свидетельствует о том, что проведенные эксперименты по погружению зерен в жидкости различной плотности согласуются с теоретическими исследованиями для эллипсоидальных зерновок. Относительное отличие объясняется принятой моделью и погрешностями эксперимента<sup>15</sup>.

### Обсуждение и заключение

В результате проведенных исследований получены выражения (формулы), по которым можно определить одни из основных параметров движения зерна в жидкости устройства очистки ржи от спорыньи. Это скорость падения зерна

ржи  $v_z = \sqrt{\frac{8c_z g(\rho_z - \rho_{zh})}{3c\rho_{zh}}}$  в жидкости

устройства, время  $t_0$  достижения зерновкой постоянного значения скоро-

сти  $v_z$  после падения и преодоления его поверхностного натяжения жидкости, а также расстояние  $h_0$ , на котором данный переходный процесс происходит.

Для устройств удаления спорыньи из ржи теоретически показано, что в воде время  $t_0 = 0,03$  с и расстояние  $h_0 = 4,0 \cdot 10^{-3}$  м переходного процесса малы. В данных устройствах в качестве жидкости применяются водные растворы солей, плотность которых больше плотности воды. Для них, как показано в статье, параметры переходного процесса будут иметь тот же порядок малости. При разработке машины для очистки ржи от спорыньи значения величин скорости  $v_z$  падения зерна необходимы для расчета угла наклона днища ванны и конструктивно-технологических параметров устройства вывода очищенных семян. Полученные значения величин переходного процесса позволяют определить места расположения устройства для разрушения слипшихся в жидкости зерен и склероциев спорыньи; для отделения пузырьков воздуха, прилипших к зернам; для транспортера удаления спорыньи из ванны с водным соевым раствором [16; 17].

Параметры движения зависят от геометрической формы, физико-механических свойств зерновок  $c_z$ ,  $\rho_z$ , плотности жидкостей  $\rho_{zh}$ , коэффициента  $c$  гидродинамического сопротивления жидкостей. Данные показатели присущи всем зерновым культурам и жидкостям, поэтому предложенный подход и полученные формулы можно применять при разработке устройств для очистки любого зернового материала по плотности мокрым способом с целью обоснования их конструктивно-технологических параметров, если геометрическая форма зерновок будет близка к форме эллипсоида.

<sup>15</sup> Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов измерений. М. : Глав. ред. физ.-мат. изд-ва «Наука», 1971. 192 с.; Зайдель А. Н. Погрешности измерений физических величин / Под ред. Ж. И. Алферова. Л. : Наука, 1985. 112 с.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Сантов В. Е.** Инновации в послеуборочной обработке зернового материала : монография. Saarbrücken : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 152 с.
2. **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. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
3. **Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М.** Некоторые приемы и средства защиты озимой ржи от спорыньи // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 3. С. 47–50. URL: <http://agroapk.ru/28-archive/03-2014/172-03-2014>
4. **Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М.** Зависимость вредоносности спорыньи от биометрических показателей склероциев // Защита и карантин растений. 2017. № 11. С. 9–12.
5. **Хазиев А. З., Пономарева М. Л.** Ущерб от спорыньи на озимой ржи и меры его предупреждения // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007. Т. 2, № 2 (6). С. 80–82. URL: [https://repository.kpfu.ru/?p\\_id=124462](https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462)
6. Increasing spread of *Claviceps purpurea* (Fr). Tul. and it's effect on the quantity and quality of winter rye / M. L. Ponomareva [et al.] // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7, issue 3. P. 1865–1871. URL: [https://www.rjpbcs.com/pdf/2016\\_7\(3\)%5B227%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)%5B227%5D.pdf)
7. **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. Vol. 42, no. 4. P. 37–40.
8. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain / P. Savinyh // Proceedings of 17<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development. 2018. P. 124–130. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>
9. **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. Vol. 150. P. 107–110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
10. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds / A. M. Gievsky [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. P. 042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
11. **Дринча В. М., Борисенко И. Б.** Применение и функциональные возможности пневмосортировальных столов // Научно-агрономический журнал. 2008. № 2 (83). С. 33–36. URL: <http://vniiish.ru/wp-content/uploads/2011/08/nazh5.pdf>
12. **Шафоростов В. Д., Припоров И. Е.** Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян подсолнечника // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 1 (32), ч. 3. С. 23–25. URL: <https://research-journal.org/technical/kachestvennyye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-frakcionnoj-tehnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika>
13. **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.
14. Статистическая оценка интервала значений удельной массы зерна озимой ржи Фаленская 4 и склероций спорыньи / В. А. Сысуев [и др.] // Успехи современного естествознания. 2017. № 10. С. 48–53. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=36559>
15. Theoretical background of calculation of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia / V. A. Sysuev [et al.] // Russian Agricultural Sciences. 2017. Vol. 43, issue 3. P. 273–276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
16. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : пат. 2616037 Рос. Федерация : МПК В 03 В 5/48, В 02 В 1/04 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Зональный научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2015148311 ; заявл. 10.11.2015 ; опубл. 12.04.2017, Бюл. № 11.
17. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : пат. 2667066 Рос. Федерация, МПК В 03 В 5/48, В 02 В 1/04 / Сысуев В. А. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого». № 2017115170/03 ; заявл. 27.04.2017 ; опубл. 18.09.2018, Бюл. № 26.

*Поступила 05.02.2019; принята к публикации 10.04.2019; опубликована онлайн 28.06.2019*

Об авторах:

**Сысеев Василий Алексеевич**, научный руководитель, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), академик РАН, доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, [sisuev@mail.ru](mailto:sisuev@mail.ru)

**Саитов Виктор Ефимович**, старший научный сотрудник, лаборатория механизации полеводства, ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Россия, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), доктор технических наук, профессор, ResearcherID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru)

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

**Саитов Алексей Викторович**, магистрант, направление подготовки «Агроинженерия», ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Россия, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), ResearcherID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, [alexseysaitov@yandex.ru](mailto:alexseysaitov@yandex.ru)

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Сысеев – научное руководство, формулирование основной концепции исследования; В. Е. Саитов – проведение критического анализа исследования, подготовка первоначального варианта текста и формулирование выводов; В. Г. Фарафонов – проведение теоретических исследований погружения зерна в жидкость и доработка текста; А. В. Саитов – анализ литературных данных и проведение экспериментальных работ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

## REFERENCES

1. Saitov A.V. Innovations in post-harvest handling of grain material. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publ.; 2012. (In Russ.)
2. 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. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012> (In Russ.)
3. 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://agroapk.ru/28-archive/03-2014/172-03-2014> (In Russ.)
4. 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.)
5. Khaziev A.Z., Ponomareva M.L. [Damage from ergot on winter rye and measures for preventing]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2007; 2(2):80-82. Available at: [https://repository.kpfu.ru/?p\\_id=124462](https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462) (In Russ.)
6. Ponomareva M.L., Ponomarev S.N., Mannapova G.S., Gilmullina L.F. Increasing spread of *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul. and its 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\(3\)/%5B227%5D.pdf](https://www.rjpbcs.com/pdf/2016_7(3)/%5B227%5D.pdf)
7. 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.
8. Savinyh P., Sychugov Y., Kazakov V., Ivanovs S. Development and theoretical studies of grain cleaning machine for fractional technology of flattening forage grain. In: *Proceedings of 17<sup>th</sup> International Scientific Conference Engineering for Rural Development Engineering for Rural Development*. 2018. p. 124-130. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>



9. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>
10. Gievsky A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Chernyshov A.V., Kurilov D.O. Substantiation of basic scheme of grain cleaning machine for preparation of agricultural crops seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327:042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
11. Drincha V.M., Borisenko I.B. Application and functionality of pneumatic sorting tables. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific and Agronomical Journal. 2008; 2:33-36. Available at: <http://nvniish.ru/wp-content/uploads/2011/08/nazh5.pdf> (In Russ.)
12. 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(3):23-25. Available at: <https://research-journal.org/technical/kachestvennye-pokazateli-raboty-fotoseparatora-po-fractionnoj-tekhnologii-pri-razdelenii-semyan-podsolnechnika> (In Russ.)
13. Saitov A.V. Features of the operation of photoseparators for cleaning grain and seeds from impurities. In: *Methods and Technologies in Plant Breeding and Crop Production*. Kirov: Agricultural Research Institute of the North-East Publ.; 2016. p. 352-355. (In Russ.)
14. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Statistical evaluation of value interval of grain specific weight of winter rye Falenskaya 4 and ergot sclerotia. *Uspekhi sovremennoy yestestvoznaniya* = Advances in Current Natural Sciences. 2017; 10:48-53. Available at: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36559> (In Russ.)
15. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Theoretical background of calculation of the parameters of the device for grain cleaning from ergot sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
16. Sysuev V.A., Saitov V.E., Savinykh P.A., Saitov A.V., inventors. Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, assignee. Machine for separating ergot from rye seeds. Ru Patent 2616037. 2017 Apr 12. (In Russ.)
17. Sysuev V.A., Saitov V.E., Gataullin R.G., Saitov A.V., Utkina E.I., Sheshegova T.K., inventors. Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky, assignee. Machine for separating ergot from rye seeds. Ru Patent 2667066. 2018 Sep 18. (In Russ.)

*Received 05.02.2019; revised 10.04.2019; published online 28.06.2019*

*About authors:*

**Vasily A. Sysuev**, Scientific Director, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin st., Kirov 610007, Russia), Academician of RAS, D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, [sisuev@mail.ru](mailto:sisuev@mail.ru)

**Viktor E. Saitov**, Senior Researcher, Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N. V. Rudnitsky (166a Lenin st., Kirov 610007, Russia), D.Sc. (Engineering), Professor, ResearcherID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru)

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

**Aleksey V. Saitov**, Master's Degree Student in Agricultural Engineering, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russia), ResearcherID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, [alexseysaitov@yandex.ru](mailto:alexseysaitov@yandex.ru)

*Contribution of the authors:*

V. A. Sysuev – scientific leadership, the formulation of the basic concept of the study; V. E. Saitov – the conduction of the study critical analysis, preparation of the initial text and conclusions; V. G. Farafonov – the theoretical studies of grain immersion in liquid and the completion of the text; A. V. Saitov – the analysis of literature data and experimental work.

*All authors have read and approved the final version of the paper.*