

# МЕХАНИЗАЦИЯ, ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ, АВТОМАТИЗАЦИЯ / MECHANIZATION, ELECTRIFICATION, AUTOMATION

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.407-419>

УДК 631.362.3



## Анализ процесса погружения зерновок в жидкостях с различной удельной массой

© 2019. В. Е. Сaitov<sup>1,2</sup>, В. Г. Фарафонов<sup>2</sup>, А. В. Сaitov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», г. Киров, Российская Федерация

*В зерновом ворохе, кроме зерна, содержатся примеси, в том числе ядовитые склероции спорыньи. Зерно и склероции спорыньи по линейным размерам и скорости витания имеют схожие характеристики. Полное разделение зерна от спорыньи по данным свойствам за один технологический процесс невыполнимо. Очистка семян от склероций спорыньи, имеющих удельную массу меньшую, чем удельная масса зерна, возможна в растворе соли. Для механизации выделения склероций спорыньи из семян ржи мокрым способом актуальным вопросом является разработка соответствующего устройства. Рассматривается погружение в воде ( $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) и водных растворах хлористого натрия (NaCl) с удельной массой  $\rho_{ж} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  отдельно взятых зерен ржи при их удельной массе  $\rho_z = 1,2 \dots 1,5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , длине  $l_z = 5,0 \dots 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , ширине  $v = 1,4 \dots 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и толщине  $\delta = 1,2 \dots 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Теоретические исследования проведены на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики, которые подтверждены экспериментальными исследованиями с зернами озимой ржи сорта Фаленская 4 с удельной массой  $\rho_z = 1,1 \dots 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , длиной  $l_z = 5,0 \dots 8,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , шириной  $v = 1,4 \dots 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и толщиной  $\delta = 1,2 \dots 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ . Установлено, что расчетные значения скоростей погружения зерновок цилиндрической и сфероидальной форм в сравнении с экспериментальными значениями в воде ( $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) составляют не более 2%, а в водных растворах хлористого натрия (NaCl) удельной массой  $\rho_{ж} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – 7 и 10% соответственно. Данный подход определения скорости погружения зерна в жидкости можно использовать при разработке машины очистки зернового материала по удельной массе мокрым способом для обоснования ее конструктивно-технологических параметров.*

**Ключевые слова:** озимая рожь, склероции спорыньи, зерноочистительная машина, пневматический сортировальный стол, цилиндрическая зерновка, сфероидальная зерновка, водные растворы, поверхностное натяжение

**Благодарности:** работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока (тема № 0767-2019-0094).

**Конфликт интересов:** авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования:** Сaitov В. Е., Фарафонов В. Г., Сaitov А. В. Анализ процесса погружения зерновок в жидкостях с различной удельной массой. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019;20(4): 407-419. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.407-419>

Поступила: 09.01.2019

Принята к публикации: 25.07.2019

Опубликована онлайн: 30.08.2019

## Analysis of the process of immersion of kernels in liquids with different specific mass

© 2019. Victor E. Saitov<sup>1,2</sup>, Vyacheslav G. Farafonov<sup>2</sup>, Aleksey V. Saitov<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Vyatka State Agricultural Academy, Kirov, Russian Federation

*In a grain pile there is material other than grain including poisonous ergot sclerotia. Grain and sclerotia of ergot by linear dimensions and speed of soaring have similar characteristics. Complete separation of grain from ergot by these properties in a single process is impossible. Cleaning seeds from ergot sclerotia with the specific mass less than the specific mass of grain is possible in a salt solution. To mechanize the separation of ergot sclerotia from rye seeds by the wet method, there is an urgent need in the development of an appropriate device. Under study was an immersion in water ( $\rho_{zh} = 1.0 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ ) and aqueous solutions of sodium chloride (NaCl) with a specific mass  $\rho_{zh} = 1.09 \cdot 10^3$  and  $1.15 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  of individual rye grains with their specific mass  $\rho_z = 1.2 \dots 1.5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , length  $l_z = 5.0 \dots 10.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ , width  $v = 1.4 \dots 3.6 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  and thickness  $\delta = 1.2 \dots 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ . Theoretical studies were carried out on the basis of mathematical modeling methods using the laws of hydrodynamics, which were confirmed by experimental studies with winter rye grains of the Falenskaya 4 variety with a specific mass  $\rho_z = 1.1 \dots 1.3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ , length*

$l_z = 5.0...8.0 \cdot 10^{-3}$  m, width  $e = 1.4...3.6 \cdot 10^{-3}$  m and thickness  $\delta = 1.2...3.5 \cdot 10^{-3}$  m. It has been established that the calculated values of the immersion velocity of cylindrical kernels and spheroidal kernels in comparison with the experimental values in water ( $\rho_{zh} = 1.0 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>) is not more than 2%, and in aqueous solutions of sodium chloride (NaCl) the specific mass  $\rho_{zh} = 1.09 \cdot 10^3$  and  $1.15 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup> – 7 and 10%, respectively. This approach to determining the speed of immersion of grain in liquid can be used in the development of the machine for cleaning grain according to specific mass using wet method to substantiate its structural and technological parameters.

**Key words:** winter rye, ergot sclerotia, grain cleaning machine, pneumatic sorting table, cylindrical kernel, spheroidal kernel, water solutions, surface tension

**Acknowledgement:** scientific work was performed in the framework of the Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky (theme 0767-2019-0094).

**Conflict of interest:** the authors stated that there was no conflict of interest.

**For citation:** Saitov V. E., Farafonov V. G., Saitov A. V. Analysis of the process of immersion of kernels in liquids with different specific mass. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019;20(4): 407-419. (In Russ.). <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.4.407-419>

Received: 09.01.2019

Accepted for publication: 25.07.2019

Published: 30.08.2019

Зерно является древнейшим продуктом питания человека, а впоследствии с развитием производительности труда и достаточным его производством – кормом для сельскохозяйственных животных [1, 2].

В настоящее время достаточно механизировано производство зерна и подготовка семенного материала. В результате зерновой ворох, доставленный от зерноуборочных комбайнов на пункты послеуборочной обработки, представляет собой смесь полноценного, мелкого, щуплого, избитого и изъеденного зерна основной культуры, зерен и семян других зерновых и зернобобовых культур и различных сорных растений, включающих и вредные [3]. К вредной примеси относятся ядовитые семена различных сорняков. Ядовитыми свойствами и горьким вкусом обладают семена горчицы, плевела, куколя и прочих ядовитых растений. Кроме перечисленных ядовитых семян сорных растений, к вредной примеси относятся головня и ядовитые склероции (рожки) спорыньи<sup>1</sup> [4, 5, 6, 7, 8]. Поэтому для получения качественного и экологически чистого зерна, пригодного для пищевых, технических и семенных целей, необходима очистка зернового вороха, задачей которой является выделение всех примесей, в особенности вредных, в том числе и ядовитых. Применение различных и сложных по конструкции зерноочистительных машин и других устройств не дает положительных результатов при очистке зернового материала от ядовитых склероций спорыньи из-за близости их физико-механических свойств по ширине, толщине, длине и скоро-

сти витания. Использование сложных по устройству и дорогостоящих по цене фотосепараторов, предназначенных для выделения различных сорных примесей по цвету, также невозможно для отделения ядовитых склероций (рожков) спорыньи от зерна из-за мутирования первых в последнее время и подстраивания их под цвет зерна [9, 10, 11, 12].

Однако зерна ржи имеют большую удельную массу ( $\rho_s = 1,2...1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), чем склероции спорыньи ( $\rho_c = 0,9...1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>)<sup>2</sup>. Поэтому практически 100% очистка семян от ядовитых склероций спорыньи, отличающихся удельной массой от зерна, возможна в водных растворах различных неорганических солей<sup>3</sup>.

Для механизации выделения склероций спорыньи из семян ржи мокрым способом актуальным вопросом является разработка устройства очистки зернового материала, отличающегося простотой по конструкции и малой энергоемкостью технологического процесса. При разработке машины очистки зернового материала по удельной массе мокрым способом и выполнения ею технологического процесса с надлежащей эффективностью выделения склероций спорыньи требуется обоснование ее конструктивно-технологических параметров.

**Цель исследования** – теоретическое и экспериментальное определение скорости погружения зерновок в жидкостях с различной удельной массой для обоснования конструктивно-технологических параметров машины по отделению спорыньи от зерна мокрым способом с целью выполнения ею с надлежащей эффективностью технологического процесса.

<sup>1</sup>Вредная примесь в зерне [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rsns.ru/documents/publications/?n=57> (дата обращения 28.11.2018).

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

<sup>3</sup>Волков А.И., Жарский И.М. Большой химический справочник. Мн.: Современная школа, 2005. 608 с.

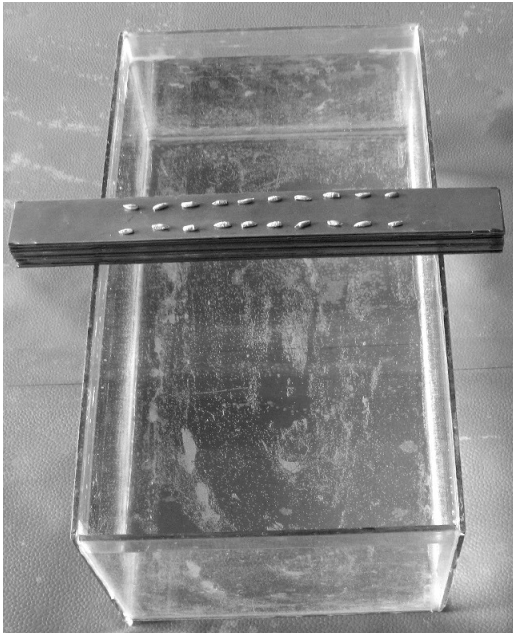
**Материал и методы.** Теоретические и практические исследования проведены в 2018...2019 гг. на базе ФГБНУ ФАНЦ Северо-Востока и ФГБОУ ВО Вятская ГСХА на основе методов математического моделирования с использованием законов гидродинамики.

Рассматривали теорию погружения отдельно взятых зерен ржи при их удельной массе  $\rho_3 = 1,2...1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, длине  $l_3 = 5,0...10,0 \cdot 10^{-3}$  м, ширине  $e = 1,4...3,6 \cdot 10^{-3}$  м и толщине  $\delta = 1,2...3,5 \cdot 10^{-3}$  м [3] в жидкостях различной удельной массы в устройстве по отделению спорыньи от зерна мокрым способом.

При проведении практических экспериментов рассматривали движение в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и водных растворах хлори-

стого натрия (NaCl) с удельной массой  $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> отдельно взятых зерен озимой ржи сорта Фаленская 4 при их удельной массе  $\rho_3 = 1,1...1,3 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, длине  $l_3 = 5,0...8,0 \cdot 10^{-3}$  м, ширине  $e = 1,4...3,6 \cdot 10^{-3}$  м и толщине  $\delta = 1,2...3,5 \cdot 10^{-3}$  м [13].

Для оценки скорости погружения зерновок в жидкости использован стеклянный сосуд, имеющий длину 0,35 м, ширину 0,20 м и высоту 0,15 м. Определение времени погружения зерновок в воду или водный раствор соли осуществляли между двумя метками, которые располагались на расстоянии 0,01 м от верхней кромки жидкости и от дна сосуда. Высота  $h_{н1}$  столба воды между данными метками составляла 0,135 м (рис. 1).



**Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования погружения зерна в жидкости / Fig. 1. Experimental setup for the study of the immersion of grain in liquid**

Рациональная высота  $h$  падения зерновок в воду или водный раствор соли, при которой происходило 100% преодоление поверхностного натяжения жидкости зерновками без захвата пузырька воздуха и погружение их в ней, составляла 0,050 м. Высота  $h$  падения зерновок обеспечивалась с помощью набора металлических пластин, устанавливаемых над сосудом. Зерновки устанавливали на верхнюю пластинку и сбрасывали в воду или водный раствор соли [14, 15].

Измерение размеров изготовленного прозрачного стеклянного сосуда, высоты  $h_{н1}$  столба воды или водного раствора соли между метками, а также высоты  $h$  сбрасывания зерновок в воду или в водный раствор соли производили с помощью металлической линейки с миллиметровыми делениями. Время  $t_{i,3}$  движения зернов-

ки в воде или водном растворе соли между двумя метками определяли с помощью компьютерного секундомера. Процесс движения зерновки в жидкости и секундомер фиксировали видеосъемкой телефоном OnePlus 3T с частотой 120 кадров в секунду и затем просматривали покадрово. С учетом фиксации двух кадров, соответствующих касанию зерновкой верхней и нижней меток, время  $t_{i,3}$  движения  $i$ -ой зерновки между данными метками столба жидкости определяли с точностью  $2/120$  с  $\approx 0,02$  с.

Среднее арифметическое значение времени движения зерновок в жидкости определяли по выражению:

$$t_{cp,3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{i,3}, \quad (1)$$

где  $N$  – число измерений времени движения зерновок в жидкости,  $N = 20$  шт.

Средние квадратические отклонения измерений времени движения зерновок в жидкости определяли по формуле<sup>4</sup>:

$$S_3(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_{i,3} - t_{cp,3})^2}. \quad (2)$$

Абсолютные погрешности измерений времени движения зерновок в жидкости определяли по выражению<sup>5</sup>:

$$\Delta t_3 = \frac{t_{p,N} S_3}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где  $t_{p,N}$  – табличный коэффициент Стьюдента, определяемый по доверительной вероятности  $p = 0,95$  и числу измерений  $N = 20$ ,  $t_{0,95; 20} = 2,09^6$ .

Общая погрешность измерений времени движения зерновок в жидкости равна:

$$\Delta t_{общ,3} = \sqrt{\Delta t_3^2 + \Delta t_{инст.}^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta t_{инст.}$  – инструментальная погрешность измерения времени движения зерновок в жидкости,  $\Delta t_{инст.} = 0,02$  с.

Относительную погрешность определения скорости движения зерновки в жидкости рассчитывали по формуле<sup>7</sup>:

$$\varepsilon_{v_3} = \sqrt{\left(\frac{\Delta t_{общ,3}}{t_{cp,3}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h_{n1}}{h_{n1}}\right)^2}, \quad (5)$$

где  $\Delta h_{n1}$  – абсолютная погрешность определения высоты столба жидкости (половина цены деления линейки),  $\Delta h_{n1} = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $h_{n1}$  – высота столба жидкости между нанесенными метками на стенке стеклянного сосуда  $h_{n1} = 0,135$  м.

Тогда абсолютную погрешность косвенного определения скорости движения зерновки в жидкости выражали формулой:

$$\Delta v_3 = \varepsilon_{v_3} \cdot v_{cp,3}, \quad (6)$$

где  $v_{cp,3}$  – среднее арифметическое значение скорости движения зерновок в жидкости.

Среднее арифметическое значение скорости движения зерновок в жидкости между нанесенными метками на стенке сосуда вычисляли по формуле:

$$v_{cp,3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{i,3}, \quad (7)$$

где  $v_{i,3}$  – скорость  $i$ -ой зерновки при погружении ее в жидкости, м/с.

В результате доверительные интервалы для оценки достоверности средних значений скоростей движения зерновок в жидкостях с различной удельной массой, полученных опытным путем, определяли по формуле<sup>8</sup>:

$$v_3 = v_{cp,3} \pm \Delta v_3. \quad (8)$$

Обработку полученных теоретических и экспериментальных данных проводили на персональном компьютере с помощью пакета программ офисной документации по статистической обработке информации Microsoft Excel 2013<sup>9</sup> и специальной программы по статистической обработке данных Sigma Plot 8.0<sup>10</sup>.

**Результаты и обсуждение.** Скорость  $v_3$  и длительность  $t_n$  погружения зерна в жидкости являются одними из основных параметров, учитываемых при разработке машины очистки зернового материала мокрым способом от склерозий спорыньи. Значения данных величин определяют конструктивно-технологические параметры разрабатываемой машины.

Для определения скорости  $v_3$  и длительности  $t_n$  погружения зерна в жидкости с ее поверхности до дна ванны машины отделения спорыньи необходимо учесть геометрические формы зерновок, имеющие большое многообразие. Геометрические модели данных зерновок можно представить в виде поперечно обтекаемого жидкостью цилиндра (цилиндрическая зерновка) и вытянутого эллипсоида вращения вокруг большой оси (сфероидальная зерновка).

Из наблюдений установлено, что при падении зерновки на поверхность жидкости и преодоления силы поверхностного натяжения она двигается в жидкости, ориентируясь в основном плашмя вследствие асимметричности расположения ее центра тяжести. Поэтому движение в жидкости цилиндрической и сфероидальной зерновок рассматриваем плашмя. Схема сил, действующих на зерновку при движении в жидкости, приведена на рисунке 2.

<sup>4</sup>Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. 3-е изд., испр. и доп. Л.: Наука, 1968. 97 с.

<sup>5</sup>Там же. С. 12-14.

<sup>6</sup>Там же. С. 83-86.

<sup>7</sup>Там же. С. 12-14.

<sup>8</sup>Зайдель А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений. С. 42-45.

<sup>9</sup>Лебедев А. Н. Понятный самоучитель Excel 2013 [Электронный ресурс]. URL: <http://kachat-knigi.ru/excel-uchebnik/2014-06-24-Ponyatnyj-samouchitel-Excel-2013.htm> (дата обращения: 01.06.2018).

<sup>10</sup>Sigma Plot [Электронный ресурс]. URL: [http://xumuktutor.ru/view\\_programm.php?id=5](http://xumuktutor.ru/view_programm.php?id=5) (дата обращения: 11.05.2018).

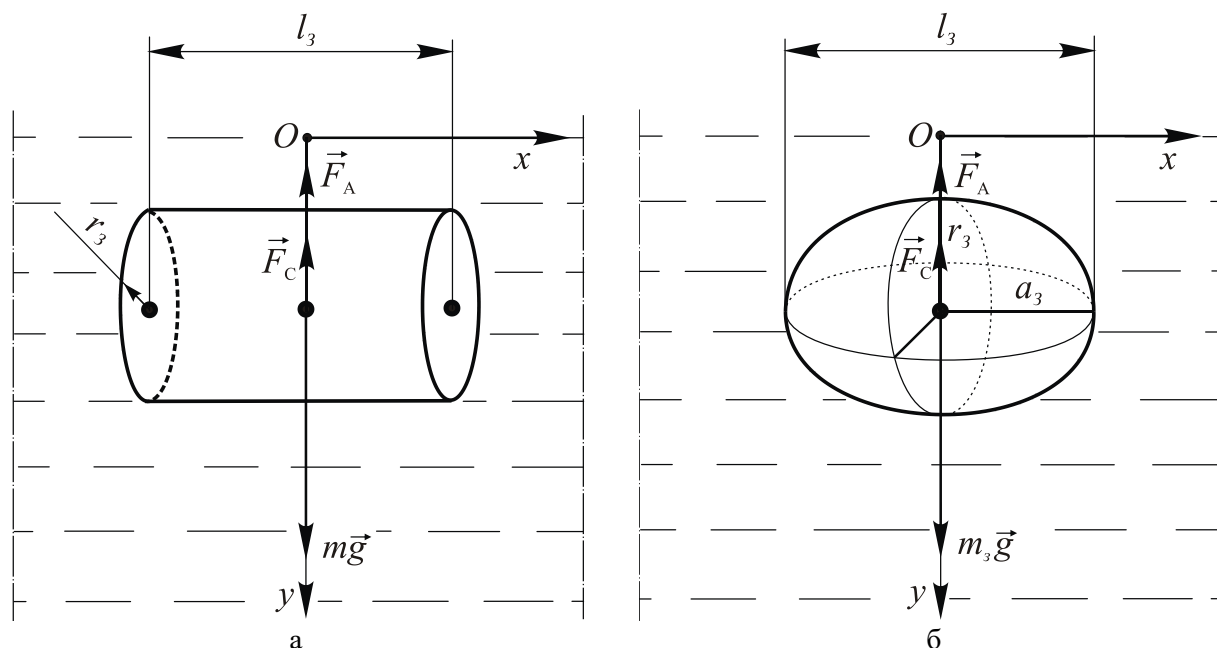


Рис. 2. Схема сил, действующих на цилиндрическую (а) и сфероидальную (б) зерновки при движении в жидкости /

Fig. 2. Diagram of the forces acting on the cylindrical (a) and spheroidal (b) kernels when moving in liquid

На зерновку будут действовать сила  $m_3 \vec{g}$  тяжести, сила  $\vec{F}_A$  Архимеда и сила  $\vec{F}_C$  гидродинамического сопротивления. Тогда, согласно второму закону Ньютона, в проекции на ось  $y$  имеем следующее уравнение<sup>11</sup>:

$$m_3 g - F_A - F_C = m_3 a, \quad (9)$$

где  $m_3$  – 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 цилиндрической зерновки будет равна:

$$m_3 = V_3 \rho_3 = \pi r_3^2 l_3 \rho_3, \quad (10)$$

где  $V_3$  – объем зерновки,  $\text{м}^3$ ;  $r_3$  – радиус зерновки, рассматриваемой в виде цилиндра, м;  $l_3$  – длина зерновки, м;  $\rho_3$  – удельная масса зерновки,  $\text{кг/м}^3$ .

Сила Архимеда  $F_A$  при движении в жидкости цилиндрической зерновки равняется весу вытесненной цилиндром жидкости<sup>12</sup>:

$$F_A = V_3 \rho_{ж} g = \pi r_3^2 l_3 \rho_{ж} g, \quad (11)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости, для воды  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

В работе С.С. Кутателадзе<sup>13</sup> рассмотрен поперечно обтекаемый жидкостью с постоянной скоростью цилиндр, приводятся число Рейнольдса  $Re$  и сила  $F$ , действующая со стороны жидкости на единицу длины цилиндра (Н/м):

$$Re = \frac{2ru}{\nu}, \quad F = 2cr \rho_{ж} u^2, \quad (12)$$

где  $r$  – радиус цилиндра (в данной работе  $r = r_3$ ), м;  $u$  – скорость жидкости, обтекающей цилиндр (в данной работе  $u = v_3$ ), м/с;  $v_3$  – постоянная скорость движения зерновки в жидкости, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления, зависящий от числа Рейнольдса  $Re$ .

Полная сила  $F_C$  гидродинамического сопротивления, действующая со стороны жидкости на зерновку длиной  $l_3$ , выражается формулой:

$$F_C = Fl_3 = 2cr_3 l_3 \rho_{ж} v^2, \quad (13)$$

где  $v$  – переменная скорость движения зерновки в жидкости, м/с.

<sup>11</sup>Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 365 с.

<sup>12</sup>Андреев Н. Н., Ржевкин С. Н., Горелик Г. С. Курс физики. - Под редакцией Папалекси Н. Д. М.: Гостехиздат, 1948. 600 с.

<sup>13</sup>Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. 1990. С. 150.

Тогда уравнение (9) для цилиндрической зерновки с учетом выражений (10), (11) и (13) примет следующий вид:

$$\pi r_3^2 l_3 \rho_3 g - \pi r_3^2 l_3 \rho_{жс} g - 2cr_3 l_3 \rho_{жс} v^2 = \pi r_3^2 l_3 \rho_3 a. \quad (14)$$

Выразим ускорение  $a$  зерновки из уравнения (14):

$$a = \frac{g(\rho_3 - \rho_{жс})}{\rho_3} - \frac{2c\rho_{жс}}{\pi r_3 \rho_3} \cdot v^2. \quad (15)$$

Введем обозначения:

$$b^2 = \frac{g(\rho_3 - \rho_{жс})}{\rho_3}, \quad d^2 = \frac{2c\rho_{жс}}{\pi r_3 \rho_3}, \quad (16)$$

тогда после преобразований соотношения (15), с учетом обозначений (16), получим уравнение для определения ускорения зерновки при ее движении в жидкости после преодоления ее поверхностного натяжения

$$a = \frac{dv}{dt} = b^2 - d^2 v^2, \quad (17)$$

где  $t$  – текущее время, с.

Скорость  $v$  движения зерновки в жидкости в зависимости от времени  $t$  находим интегрированием дифференциального уравнения (17):

$$\int dt = t = \int \frac{dv}{b^2 - d^2 v^2} = \frac{1}{2bd} \ln \left| \frac{\frac{b}{d} + v}{\frac{b}{d} - v} \right| + C_1 \quad (18)$$

где  $C_1$  – постоянная интегрирования.

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

$$\tau = \frac{1}{2bd} = \sqrt{\frac{\pi r_3 \rho_3^2}{8c g \rho_{жс} (\rho_3 - \rho_{жс})}}, \quad (19)$$

$$v_0 = \frac{b}{d} = \sqrt{\frac{\pi r_3 g (\rho_3 - \rho_{жс})}{2c \rho_{жс}}} \quad (20)$$

и преобразований уравнения (18) получим

$$\ln \left| \frac{v_0 + v}{v_0 - v} \right| = \frac{t}{\tau}, \quad (21)$$

где  $v_0$  – скорость зерновки, к которой после преодоления поверхностного натяжения жидкости стремится скорость  $v$ , с которой будет

в дальнейшем двигаться зерновка 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, физико-механическими свойствами зерновки  $\rho_3$ ,  $r_3$ , удельной массой  $\rho_{жс}$  жидкости, коэффициентом  $c$  гидродинамического сопротивления жидкости.

Скорость  $v$  зерновки в жидкости будет возрастать от нуля до  $v_0$ , поэтому модуль в уравнении (13) при его преобразовании можно отбросить, тогда

$$v = \frac{dy}{dt} = v_0 \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1}. \quad (22)$$

Интегрируем дифференциальное уравнение (22):

$$\int_0^{h_1} dy = v_0 \int_0^{t_1} \frac{e^{\frac{t}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t}{\tau}} + 1} dt, \quad (23)$$

где  $h_1$  – текущее расстояние, пройденное зерновкой в жидкости, м;  $t_1$  – время, за которое зерновка проходит расстояние  $h_1$ , с.

Тогда получим зависимость пройденного зерновкой в жидкости расстояния  $h_1$  от затраченного на это время  $t_1$

$$h_1 = v_0 \left( 2\tau \ln(e^{\frac{t_1}{\tau}} + 1) - t_1 \right). \quad (24)$$

Заменяя в уравнении (24) расстояние  $h_1$  на высоту  $h_n$  жидкости в ванне машины выделения склероций спорыньи, а  $t_1$  на время  $t_n$  погружения зерновки в жидкости от момента преодоления поверхностного натяжения до дна ванны, получим

$$2\tau \ln \left( e^{\frac{t_n}{\tau}} + 1 \right) - t_n = \frac{h_n}{v_0}. \quad (25)$$

Уравнение (25) дает зависимость времени  $t_n$  погружения зерновки до дна от высоты  $h_n$  столба жидкости в ванне.

Для определения коэффициента  $c$  гидродинамического сопротивления найдем значение числа Рейнольдса  $Re$  для скорости зерновки в жидкости  $v_3 = u = 0,1$  м/с, определенной предварительными опытами, значения

кинематической вязкости воды  $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$  и среднего радиуса  $r_{\text{ср.з}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  зерновки модели поперечного цилиндра<sup>14</sup>.

Величина среднего радиуса зерновки определяется из ширины  $\epsilon = 1,4 \dots 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  и толщины  $\delta = 1,2 \dots 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  зерен ржи по формуле:

$$2r_{\text{ср.з}} = \frac{\delta_{\text{min}} + \epsilon_{\text{max}}}{2}, \quad (26)$$

где  $\delta_{\text{min}}$  – минимальное значение толщины зерновки,  $\delta_{\text{min}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $\epsilon_{\text{max}}$  – максимальное значение ширины зерновки,  $\epsilon_{\text{max}} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Тогда по выражению (12) число Рейнольдса  $Re = 240$ . Для этого значения в работе С.С. Кутателадзе<sup>15</sup> находим величину коэффициента гидродинамического сопротивления для поперечного цилиндра  $c = 1,2$ .

Найдем значение времени  $\tau$  по формуле (19) для промежуточных значений физико-механических свойств зерновки  $r_{\text{ср.з}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\rho_{\text{ср.з}} = 1,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , жидкости  $\rho_{\text{ж}} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  и коэффициента  $c = 1,2$  гидродинамического сопротивления, которое будет составлять  $0,015 \text{ с}$ .

Из предварительных опытов установлено, что время  $t_n$  погружения зерновки в жидкости до дна ванны машины выделения склероций спорыньи составляет больше одной

секунды, то  $\frac{t_n}{\tau} \gg 1$  и, следовательно,  $e^{\frac{t_n}{\tau}} \gg 1$

, тогда уравнение (25) примет вид

$$2\tau \cdot \frac{t_n}{\tau} - t_n = \frac{h_n}{v_0} \quad \text{или} \quad t_n = \frac{h_n}{v_0}. \quad (27)$$

С точки зрения проектирования и создания машины выделения склероций спорыньи из зерна ржи важно знать время  $t_0$  (время переходного процесса), за которое зерновка достигнет постоянного значения  $v_0$ . Как принято в физике<sup>16</sup>, это время  $t_0$  достижения скоростью  $v$  зерновки  $(1 - \frac{1}{e})$  части скорости  $v_0$  в формуле (22):

$$\frac{e^{\frac{t_0}{\tau}} - 1}{e^{\frac{t_0}{\tau}} + 1} = 1 - \frac{1}{e}, \quad (28)$$

которое получим после преобразования (28):

$$t_0 = \ln(2e - 1) \cdot \tau = 1,49\tau. \quad (29)$$

Тогда, при  $\tau = 0,015 \text{ с}$  значение времени  $t_0$  переходного процесса по формуле (29) составит  $0,022 \text{ с}$ , а расстояние  $h_0$ , на котором происходит этот процесс, по формуле (24) будет равно  $0,003 \text{ м}$ . При других возможных значениях  $r_z$ ,  $\rho_z$ ,  $\rho_{\text{ж}}$  время  $t_0$  достижения постоянной скорости  $v_0$  будет иметь тот же малый порядок, то же можно сказать и о расстоянии  $h_0$ , пройденном зерновкой на переходном процессе.

Из полученных 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 жидкости до дна ванны машины выделения склероций спорыньи, которое больше секунды, а высота  $h_n$  столба жидкости в ванне может достигать десятки сантиметров. Тогда скорость зерновки можно считать постоянной  $v_0 = v_z$ , а ускорение  $a$  в уравнении (9) равным нулю, а потому в течение всего времени  $t_n$  движения зерновки от начала погружения до падения на дно ванны ее скорость  $v_z$  можно определять по формуле (20).

Для сфероидальной зерновки при движении в жидкости сила  $F_C$  гидродинамического сопротивления определяется по формуле<sup>17</sup>:

$$F_C = \frac{cS\rho_{\text{ж}}v_z^2}{2}, \quad (30)$$

где  $c$  – коэффициент гидродинамического сопротивления вытянутого эллипсоида вращения с более обтекаемой геометрической формой, чем поперечный цилиндр,  $c = 0,9^{18}$ ;  $S$  – площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению движения зерновки (миделево сечение),  $\text{м}^2$ .

При движении в жидкости сфероидальной зерновки вдоль малой оси (плашмя) площадь миделевого сечения (эллипса) равна<sup>19</sup>:

$$S = \pi r_z a_z, \quad (31)$$

где  $r_z$  – радиус вращения эллипсоида (малая полуось эллипса),  $\text{м}$ ;  $a_z$  – большая полуось эллипса,  $\text{м}$ .

<sup>14</sup>Справочник по гидравлическим расчетам 5-е изд., доп. и перераб. под ред. П. Г. Киселева. М.: Энергия, 1974. 312 с.

<sup>15</sup>Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. 1990. С. 150.

<sup>16</sup>Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. 2-е изд., перераб., и доп. 1954. 795 с.

<sup>17</sup>Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520 с.

<sup>18</sup>Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. 1990. С. 149.

<sup>19</sup>Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1980. 976 с.

Масса сфероидальной зерновки будет равна<sup>20</sup>:

$$m_z = V_z \rho_z = \frac{4}{3} \pi r_z^2 a_z \rho_z \quad (32)$$

Сила Архимеда  $F_A$  при погружении в жидкость сфероидальной зерновки составляет [16]:

$$F_A = V_z \rho_{ж} g = \frac{4}{3} \pi r_z^2 a_z \rho_{ж} g \quad (33)$$

Для сфероидальной зерновки также справедливы результаты теоретических исследований о времени  $t_0$  и расстоянии  $h_0$ , на котором происходит переходный процесс в начальной стадии погружения цилиндрической зерновки в жидкость. Поэтому ускорение  $a$  зерновки в уравнении (9) можно взять равным нулю.

Тогда, подставляя в уравнение (9) выражения (30), (31), (32) и (33), получим:

$$\frac{4}{3} \pi r_z^2 a_z \rho_z g - \frac{4}{3} \pi r_z^2 a_z \rho_{ж} g - \frac{\pi c r_z a_z \rho_{ж} v_z^2}{2} = 0 \quad (34)$$

Проведя преобразования выражения (34), найдем скорость погружения в жидкости сфероидальной зерновки (плашмя):

$$v_z = \sqrt{\frac{8r_z g (\rho_z - \rho_{ж})}{3c\rho_{ж}}} \quad (35)$$

Зависимости скорости  $v_z$  погружения цилиндрической (20) и сфероидальной (35) зерновок в жидкости удельной массой  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3$ ;  $1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> от их радиуса  $r_z$  и удельной массы  $\rho_z$  зерна представлены в виде поверхностей на рисунке 3.

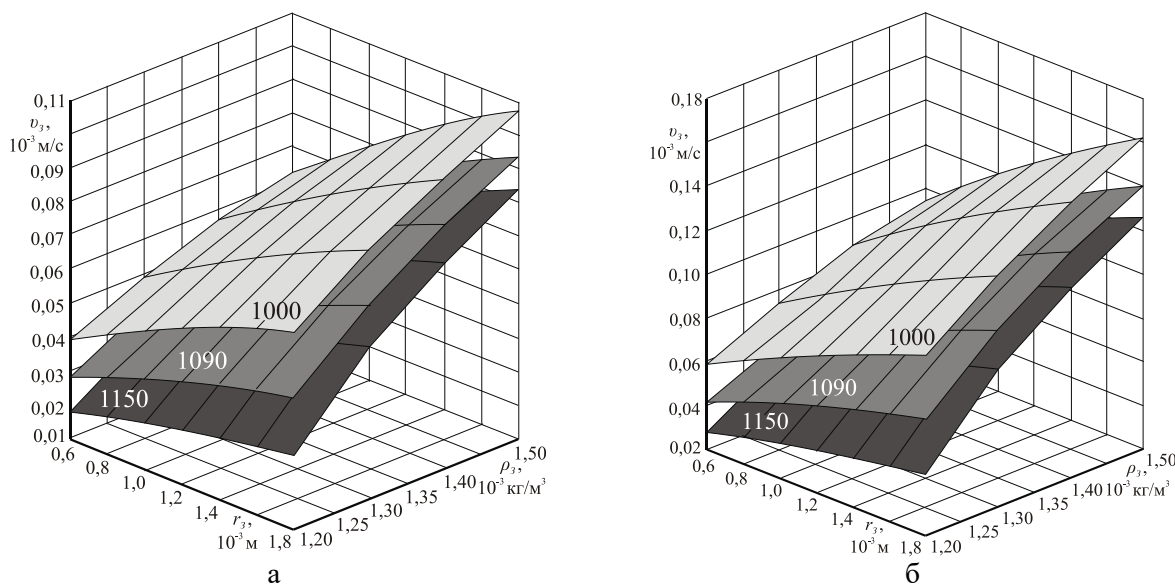


Рис. 3. Зависимости скорости  $v_z$  погружения цилиндрической (а) и сфероидальной (б) зерновок в жидкости удельной массой  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3$ ;  $1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> от радиуса  $r_z$  и удельной массы  $\rho_z$  зерна /

Fig. 3. Dependence of the velocity  $v_z$  of the immersion of cylindrical (a) and spheroidal (b) kernels in liquid with a specific mass  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3$ ;  $1,09 \cdot 10^3$  and  $1,15 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup> of the radius  $r_z$  and the specific mass  $\rho_z$  of grain

Из рисунка 3 следует, что для обеих моделей зерновок при увеличении радиуса  $r_z$  и их удельной массы  $\rho_z$  значение скорости  $v_z$  возрастает. При увеличении удельной массы  $\rho_{ж}$  жидкости значения скорости  $v_z$  погружения зерновок уменьшаются.

Минимальные скорости  $v_{z \min}$  погружения зерновок в жидкости определяются при значениях параметров зерна ржи  $r_z = 0,6 \cdot 10^3$  м и  $\rho_z = 1,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При этих параметрах цилиндрической зерновки  $v_{z \min} = 0,039$ ;  $0,028$  и  $0,018$  м/с, а для сфероидальной зерновки

$v_{z \min} = 0,059$ ;  $0,042$  и  $0,028$  м/с для удельной массы жидкости  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3$ ;  $1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> соответственно.

Максимальные скорости  $v_{z \max}$  погружения зерновок в жидкости определяются при значениях параметров зерна ржи  $r_z = 1,8 \cdot 10^3$  м и  $\rho_z = 1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. При этих параметрах цилиндрической зерновки  $v_{z \max} = 0,107$ ;  $0,093$  и  $0,084$  м/с, а для сфероидальной зерновки  $v_{z \max} = 0,162$ ;  $0,140$  и  $0,126$  м/с при удельной массе жидкости  $\rho_{ж} = 1,0 \cdot 10^3$ ;  $1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> соответственно.

<sup>20</sup>Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. С. 331.

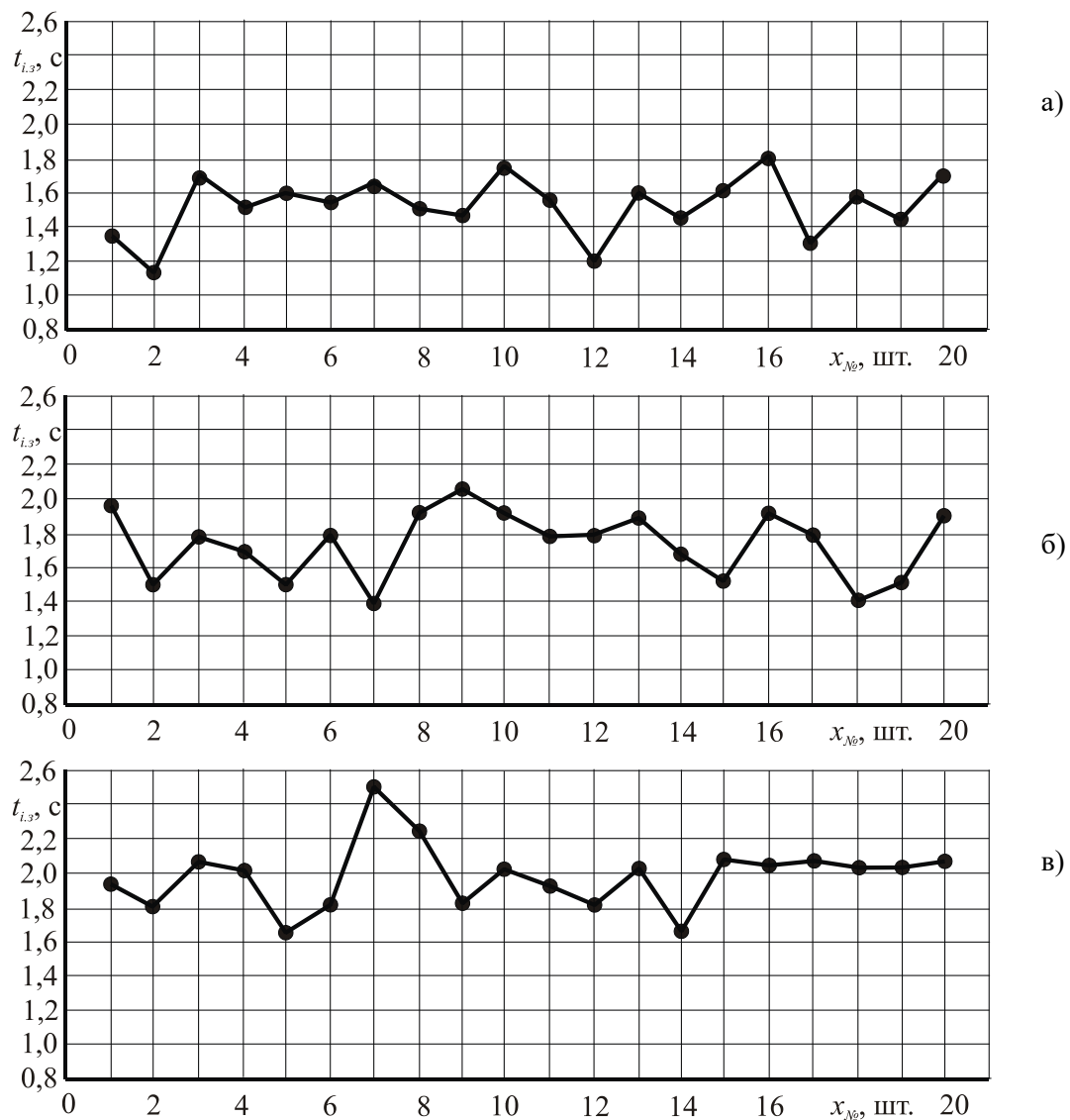


При движении в жидкости отдельных зерновок скорость  $v_z$  определяется их геометрическими формами и плотностью  $\rho_z$  зерна. При движении в жидкости зернового материала потоком, вследствие столкновения зерновок между собой, скорости их будут усредняться. Поэтому для 28 пар значений радиуса  $r_z$  и удельной массы  $\rho_z$  (рис. 3) расчетное среднее арифметическое значение скорости  $v_{cp.z теор.}$

погружения цилиндрических зерновок в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) составляет 0,071 м/с, а в водных растворах соли удельной массой  $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – 0,058 и 0,049 м/с соответственно. При этом расчетное среднее

арифметическое значение скорости  $v_{cp.z теор.}$  погружения сфероидальных зерновок в жидкости удельной массой  $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$ ,  $1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> равно 0,108; 0,088 и 0,073 м/с соответственно.

Результаты проведенных практических экспериментов приведены в виде зависимости времени  $t_{i.z}$  погружения зерна озимой ржи Фаленская 4 на глубину  $h_{п1} = 0,135$  м между метками в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и водных растворах соли ( $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) от номера  $x_{№}$  проведенного опыта, которые представлены на рисунке 4.



**Рис. 4. Зависимости времени  $t_{i.z}$  погружения зерна озимой ржи сорта Фаленская 4 в жидкости от номера  $x_{№}$  проведенного опыта: а – в воде удельной массы  $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; б – в водном растворе соли удельной массы  $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; в – в водном растворе соли удельной массы  $\rho_{жс} = 1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> /**

**Fig. 4. Dependence of the time  $t_{i.z}$  of immersion of Falenskaya 4 winter rye variety grain in liquid from the number  $x_{№}$  of the experiment: а – in water with the specific mass  $\rho_z = 1.0 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>; б – in an aqueous salt solution with the specific mass  $\rho_z = 1.09 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>; в – in an aqueous salt solution with the specific mass  $\rho_z = 1.15 \cdot 10^3$  kg/m<sup>3</sup>**

Зависимость времени  $t_{i,3}$  погружения зерна озимой ржи сорта Фаленская 4 в воду ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) от номера  $x_{№}$  проведенного опыта показывает, что пределы варьирования времени  $t_{i,31000}$  в опытах составляют 1,11...1,81 с. Среднее значение времени  $t_{cp,31000}$  погружения зерновок соответствует значению 1,52 с. Среднее квадратическое отклонение  $S_{31000}$  измерений времени движения зерновок в воде равно 0,178, а абсолютная погрешность  $\Delta t_{31000}$  составляет 0,083. Общая погрешность  $\Delta t_{общ,31000}$  измерений времени движения зерновок равна 0,086.

При этом минимальная скорость  $v_{3 \text{ min.1000}}$  погружения зерна на глубину 0,135 м равна 0,074 м/с, а максимальная  $v_{3 \text{ max1000}} = 0,121$  м/с. Среднее арифметическое значение скорости  $v_{cp,3 \text{ опыт.1000}}$  зерновки из экспериментальных данных согласно выражению (7) составляет 0,091 м/с. Тогда, в соответствии с выражением (5) относительная погрешность  $\varepsilon_{v_{31000}}$  определения скорости движения зерновок равна 0,060. В результате абсолютная погрешность  $\Delta v_{31000}$  косвенного определения скорости движения зерновки в воде согласно выражению (6) составляет 0,005. Доверительный интервал  $v_{cp,31000} \pm \Delta v_{31000}$  скорости погружения зерновок с надежностью  $p = 0,95$  составляет 0,086...0,096 м/с.

Пределы варьирования времени  $t_{i,3}$  в опытах при движении зерен в водном растворе соли удельной массой  $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  составляют 1,40...2,20 с. Среднее значение времени  $t_{cp,31090}$  погружения зерновок соответствует значению 1,76 с. Среднее квадратическое отклонение  $S_{31090}$  измерений времени движения зерновок равно 0,207, а абсолютная погрешность  $\Delta t_{31090}$  составляет 0,097. Общая погрешность  $\Delta t_{общ,31090}$  измерений времени движения зерновок равна 0,099.

При этом минимальная скорость  $v_{3 \text{ min.1090}}$  погружения зерна равна 0,061 м/с, а максимальная  $v_{3 \text{ max1090}} = 0,096$  м/с. Среднее арифметическое значение скорости  $v_{cp,3 \text{ опыт.1090}}$  зерновки при этой удельной массе жидкости равно 0,078 м/с. Тогда, в соответствии с выражением (5) относительная погрешность  $\varepsilon_{v_{31090}}$  определения скорости движения зерновки составляет 0,060. В результате абсолютная погрешность  $\Delta v_{31090}$  косвенного определения скорости движения зерновки в воде согласно выражению (6) составляет 0,005. Доверительный

интервал  $v_{cp,31090} \pm \Delta v_{31090}$  скорости погружения зерновок с надежностью  $p = 0,95$  составляет 0,073...0,083 м/с.

В практических опытах при погружении зерен в водном растворе соли удельной массой  $\rho_{жс} = 1,15 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  время  $t_{i,3}$  их движения составляет 1,63...2,57 с. Среднее значение времени  $t_{cp,31150}$  погружения зерновок соответствует значению 2,05 с. Среднее квадратическое отклонение  $S_{31150}$  измерений времени движения зерновок равно 0,242, а абсолютная погрешность  $\Delta t_{31150}$  составляет 0,113. Общая погрешность  $\Delta t_{общ,31150}$  измерений времени движения зерновок равна 0,115.

При этом минимальная скорость  $v_{3 \text{ min.1150}}$  погружения зерна равна 0,053 м/с, а максимальная  $v_{3 \text{ max1150}} = 0,083$  м/с. Среднее арифметическое значение скорости  $v_{cp,3 \text{ опыт.1150}}$  зерновок из полученных опытных данных составляет 0,067 м/с. Тогда, в соответствии с выражением (5) относительная погрешность  $\varepsilon_{v_{31150}}$  определения скорости движения зерновки составляет 0,060. В результате абсолютная погрешность  $\Delta v_{31150}$  косвенного определения скорости движения зерновки в воде согласно выражению (6) составляет 0,004. Доверительный интервал  $v_{cp,31150} \pm \Delta v_{31150}$  скорости погружения зерновок с надежностью  $p = 0,95$  составляет 0,063...0,071 м/с.

Сравнение экспериментальных и теоретических исследований показывает, что время  $t_{cp,3}$  погружения цилиндрических зерновок больше времени погружения реальных зерновок, которое больше такого же времени  $t_{cp,3}$  для сферидальных зерновок. Это объясняется тем, что цилиндр как геометрическая форма зерновки отличается от формы реальной зерновки большей площадью миделевого сечения, входящей в силу  $F_C$  гидродинамического сопротивления (13) жидкости движению в ней зерновки. У цилиндра это площадь прямоугольника и равна  $2r_3 l_3$ . Миделево сечение реальной зерновки будет вписываться в прямоугольник, поэтому ее площадь меньше площади прямоугольника. Кроме того, цилиндр является плохообтекаемым телом в отличие от реальной зерновки, поэтому для него коэффициент  $c = 1,2$  гидродинамического сопротивления больше по значению, чем для реальной зерновки<sup>21</sup>.

<sup>21</sup>Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. 1990. С. 150.

Из соотношения для силы  $F_C$  гидродинамического сопротивления (13) следует, что сила  $F_C$  гидродинамического сопротивления, действующая на цилиндрическую зерновку, больше такой же силы, действующей на реальную зерновку. Поэтому время падения цилиндрической зерновки больше времени падения реальной, а скорость меньше, что видим по результатам исследования.

Для сфероидальной модели зерновки значение коэффициента  $c$  гидродинамического сопротивления жидкости меньше такого же коэффициента реальных зерновок, так как они не имеют идеальную сфероидальную геометрическую форму. Следовательно, сила гидродинамического сопротивления жидкости, действующая на реальную зерновку, больше такой же силы (30), действующей на сфероидальную зерновку, отсюда скорость падения реальной зерновки в жидкости будет меньше скорости сфероидальной зерновки.

Найдем среднее значение  $v_{ср.мод.}$  средних арифметических значений скоростей  $v_{ср.з.теор.}$  зерновок двух моделей (цилиндрической и сфероидальной) в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и водных растворах соли ( $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>), которое составляет 0,089; 0,073 и 0,061 м/с соответственно. Сопоставление расчетных значений скоростей  $v_{ср.мод.}$  погружения цилиндрической и сфероидальной зерновок в жидкостях с различной удельной массой  $\rho_{жс}$  с экспериментальными  $v_{ср.з.оыт.}$  показало, что они одного порядка и практически имеют близкие значения. Относительное различие

в процентах скоростей данных зерновок, определяемое по формуле

$$\delta_{v_z} = \frac{|v_{ср.мод.} - v_{ср.з.оыт.}|}{v_{ср.мод.}} \cdot 100, \quad (36)$$

показывает, что при погружении зерновки в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) составляет не более 2%, а в водных растворах хлористого натрия (NaCl) удельной массой  $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> – 7 и 10% соответственно. Это свидетельствует о том, что проведенные эксперименты по погружению зерен в жидкостях различной удельной массы согласуются с теоретическими исследованиями для цилиндрической и сфероидальной зерновок.

**Заключение.** Таким образом, расчетные значения скоростей  $v_{ср.мод.}$  погружения зерна в воде ( $\rho_{жс} = 1,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) и водных растворах соли ( $\rho_{жс} = 1,09 \cdot 10^3$  и  $1,15 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>) в сравнении с экспериментальными  $v_{ср.з.оыт.}$  значениями одного порядка практически близки. Относительное различие в процентах скоростей данных зерновок не более чем на 10%. Отличие объясняется принятыми моделями и погрешностями эксперимента. Поэтому полученные теоретические формулы для определения скорости  $v_z$  погружения в жидкости зерновок цилиндрической и сфероидальной форм можно использовать при разработке машины очистки зернового материала по удельной массе мокрым способом для обоснования ее конструктивно-технологических параметров с целью выполнения ею с надлежащей эффективностью технологического процесса.

#### Список литературы

1. Вобликов Е. М., Буханцов В. А., Маратов Б. К., Прокопец А. С. Послеуборочная обработка и хранение зерна. Ростов-на-Дону: МарТ, 2001. 229 с. Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/623764/>
2. Сысуев В. А., Кедрова Л. И., Лаптева Н. К., Уткина Е. И., Вянянен М., Никулина Т. Н. Энергия ржи для здоровья человека. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2010. 103 с.
3. Бурков А. И. Разработка и совершенствование пневмосистем зерноочистительных машин. Киров: ФГБНУ «НИИСХ Северо-Востока», 2016. 380 с.
4. Хазиев А. З., Пономарева М. Л. Ущерб от спорыньи на озимой ржи и меры его предупреждения. Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2007;2(6):80-82. Режим доступа: [https://repository.kpfu.ru/?p\\_id=124462](https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462)
5. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N., Mannapova G. S., Gilmullina L.F. 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.
6. Щеклеина Л. М., Шешегова Т. К. Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): история и современность (обзор). Теоретическая и прикладная экология. 2013;(1):5-12. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2013-1-005-012>
7. Немкович А. И. Последствия зараженности озимой ржи спорыньей. Защита и карантин растений. 2005;(5):42-43.
8. Шешегова Т. К., Щеклеина Л. М. Зависимость вредоносности спорыньи от биометрических показателей склероциев. Защита и карантин растений. 2017;(11):9-12. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30578126>

9. 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 electronic resource. 2018;327:042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
10. Дринча В. М., Борисенко И. Б. Применение и функциональные возможности пневмосортировальных столов. Научно-аграрный журнал. 2008;(2 (83)):33-36. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-i-funktsionalnye-vozmozhnosti-pnevmosortirovalnyh-stolov>
11. Шафоростов В. Д., Припоров И. Е. Качественные показатели работы фотосепаратора по фракционной технологии при разделении семян подсолнечника. Международный научно-исследовательский журнал. 2015;(1-3 (32)):23-25. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22956665>
12. Astanukulov 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.
13. Сысоев В. А., Сайтов В. Е., Фарафонов В. Г., Сайтов А. В. Статистическая оценка интервала значений удельной массы зерна озимой ржи Фаленская 4 и склеротий спорыньи. Успехи современного естествознания. 2017;(10):48-53. Режим доступа: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36559>
14. Sysuev V. A., Saitov V. E., Farafonov V. G., Suvorov A. N., Saitov A. V. Theoretical Background of Calculating 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>
15. 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.
16. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика: гидродинамика. 5-е изд., стереот. М.: Физматлит, 2001. Т. 5. С.736.

#### References

1. Voblikov E. M., Bukhantsov V. A., Maratov B. K., Prokopets A. S. *Posle-uborochnaya obrabotka i khranenie zerna*. [Postharvest processing and storage of grain]. Rostov-na-Donu: MarT, 2001. 229 p. URL: <https://www.twirpx.com/file/623764/>
2. Sysuev V. A., Kedrova L. I., Lapteva N. K., Utkina E. I., Vyayanyan M., Nikulina T. N. *Energiya rzhi dlya zdorov'ya cheloveka*. [Rye energy for human health]. Kirov: NIISKh Severo-Vostoka, 2010. 103 p.
3. Burkov A. I. *Razrabotka i sovershenstvovanie pnevmositem zernoochi-stitel'nykh mashin*. [Development and improvement of pneumatic systems of grain cleaning machines]. Kirov: FGBNU «NIISKh Severo-Vostoka», 2016. 380 p.
4. Khaziev A. Z., Ponomareva M. L. Ushcherb ot sporyn'i na ozimoy rzhi i mery ego preduprezhdeniya. [Damage from ergot on winter rye and measures to prevent it]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of the Kazan State Agrarian University. 2007;2(2(6)):80-82. (In Russ.). URL: [https://repository.kpfu.ru/?p\\_id=124462](https://repository.kpfu.ru/?p_id=124462)
5. Ponomareva M. L., Ponomarev S. N., Mannapova G. S., Gilmullina L. F. 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.
6. Shchekleina L. M., Sheshhegova T. K. *Problema sporyn'i zlakov (Claviceps purpurea (Fr.) Tul.): istoriya i sovremennost' (obzor)*. [The problem of the ergot of cereals (*Claviceps purpurea* (Fr.) Tul.): history and modernity (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>
7. Nemkovich A. I. *Posledstviya zarazhennosti ozimoy rzhi sporyn'ey*. [Consequences of infection of winter rye with ergot]. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2005;(5):42-43. (In Russ.).
8. Sheshhegova T. K., Shchekleina L. M. *Zavisimost' vredonosnosti sporyn'i ot biometricheskikh pokazateley sklerotsiev*. [The dependence of the harmfulness of ergot on the biometric indicators of sclerotia]. *Zashchita i karantin rasteniy*. 2017;(11):9-12. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30578126>
9. 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 electronic resource. 2018;327:042035. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>
10. Drincha V. M., Borisenko I. B. *Primenenie i funktsional'nye voz-mozhnosti pnevmosortiroval'nykh stolov*. [Application and functionality of pneumatic sorting tables]. *Nauchno-agronomicheskii zhurnal* = Scientific Agronomy Journal. 2008;(2(83)):33-36. (In Russ.). URL: <https://cyberleninka.ru/article/v/primenenie-i-funktsionalnye-vozmoz-hnosti-pnevmosortirovalnyh-stolov>
11. Shaforostov V. D., Priporov I. E. *Kachestvennye pokazateli raboty fotoseparatora po fraktsionnoy tekhnologii pri razdelenii semyan podsolnechnika*. [Qualitative indicators of color separator fractional technology

for the separation of sunflower seeds]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* = International Research Journal. 2015;(1-3 (32)):23-25. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22956665>

12. 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.

13. Sysuev V. A., Saitov V. E., Farafonov V. G., Saitov A. V. *Statisticheskaya otsenka intervala znacheniy udel'noy massy zerna ozimoy rzhi Falenskaya 4 i sklerotsiy sporyn'i*. [Statistical evaluation of the interval of values of specific gravity of Falenskaya 4 winter rye grain and ergot sclerotia]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2017;(10):48-53. (In Russ.). URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=36559>

14. Sysuev V. A., Saitov V. E., Farafonov V. G., Suvorov A. N., Saitov A. V. Theoretical Background of Calculating 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>

15. Saitov V. E., Farafonov V. G., Saitov A. V. *Otsenka vysoty raspolozheniya vykhoda bunkera s pitatelem otnositel'no urovnya rastvora soli v vanne mashiny dlya ochistki zernovogo materiala po udel'nomu vesu*. [Estimation of the height of the output location of the hopper with a feeder relative to the level of salt solution in the bath of the machine for cleaning the grain material by specific weight]. *Aktual'nye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva. Mosolovskie chteniya: materialy Mezhdunarod. nauch.-prakt. konf.* [Topical issues of improving the technology of production and processing of agricultural products. Mosolovskie reading: International materials scientific-practical conf.]. Yoshkar-Ola: *FGBOU VO «Mar. gos. un-t»*, 2016. Iss. XVIII. pp. 241-244.

16. Landau L. D., Lifshits E. M. *Teoreticheskaya fizika: gidrodinamika*. [Theoretical physics: hydrodynamics]. 5-e izd., stereot. Moscow: *Fizmatlit*, 2001. Vol. 5. pp. 736.

#### **Сведения об авторах:**

✉ **Сайтов Виктор Ефимович**, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого», д. 166а, ул. Ленина, г. Киров, Российская Федерация, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), профессор кафедры эксплуатации и ремонта машинно-тракторного парка ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», д. 133, Октябрьский проспект, г. Киров, Российская Федерация, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>**, e-mail: [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru),

**Фарафонов Вячеслав Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой математики и физики, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», д. 133, Октябрьский проспект, г. Киров, Российская Федерация, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>**, e-mail: [farwg@mail.ru](mailto:farwg@mail.ru),

**Сайтов Алексей Викторович**, магистрант, ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», д. 133, Октябрьский проспект, г. Киров, Российская Федерация, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>**, e-mail: [alexseysaitov@yandex.ru](mailto:alexseysaitov@yandex.ru)

#### **Information about the authors:**

✉ **Victor E. Saitov**, DSc in Engineering, professor, senior researcher, Federal Agricultural Research Center of the North-East named N.V. Rudnitsky, Lenina str., 166a, Kirov, Russian Federation, 610007, e-mail: [priemnaya@fanc-sv.ru](mailto:priemnaya@fanc-sv.ru), professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vyatka State Agricultural Academy”, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), 610017, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>**, e-mail: [vicsait-valita@e-kirov.ru](mailto:vicsait-valita@e-kirov.ru),

**Vyacheslav G. Farafonov**, PhD in Physical and Mathematical Sciences, associate professor, Head of the Department of Mathematics and Physics, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vyatka State Agricultural Academy”, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5020-3648>**, e-mail: [farwg@mail.ru](mailto:farwg@mail.ru),

**Alexey V. Saitov**, undergraduate, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Vyatka State Agricultural Academy”, Oktyabrsky Avenue, 133, Kirov, Russian Federation, 610017, e-mail: [info@vgsha.info](mailto:info@vgsha.info), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>**, e-mail: [alexseysaitov@yandex.ru](mailto:alexseysaitov@yandex.ru)

✉ - Для контактов / Corresponding author