



Исследование погружения зерна потоком в жидкость различной плотности методами планирования эксперимента

А. В. Сайтов^{1,2}, В. А. Сысуев¹, В. Е. Сайтов^{1*}

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

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

*vicsait-valita@e-kirov.ru

Введение. В зерновом ворохе ржи кроме зерна могут содержаться ядовитые склероции спорыньи. Современные зерноочистительные машины не обеспечивают выделение склероциев спорыньи за один технологический процесс из-за схожести физических свойств по линейным размерам. Выделение склероциев спорыньи из зерна ржи за один технологический процесс по плотности возможно с применением водных растворов неорганических солей. Цель исследования – определение эффективной высоты расположения загрузочного бункера относительно поверхности жидкости. Эти данные повысят качество технологического процесса разрабатываемой машины.

Материалы и методы. Рассматривается подача зерна ржи потоком из выпускного отверстия загрузочного бункера в жидкость с помощью варьирования удельной зерновой нагрузки, плотности жидкости и высоты подачи. Для постановки опытов реализована методика планирования эксперимента. Обработка опытных данных осуществлена с помощью статистического пакета Statgraphics Plus 5.1.

Результаты исследования. Проведена оценка эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера относительно поверхности жидкости при подаче зернового материала потоком. Получены регрессионные модели для доли зерен, непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха на поверхность жидкости.

Обсуждение и заключение. Установлено, что на показатели доли зерен, непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха на поверхность жидкости, существенное влияние оказывает плотность водного раствора соли. Наименьшие значения при разных плотности жидкости и удельной зерновой нагрузке достигаются при высоте подачи зерна $56,0 \cdot 10^{-3}$ м.

Ключевые слова: зерно озимой ржи, склероции спорыньи, метод планирования эксперимента, водный раствор соли, поверхностное натяжение жидкости, дисперсионный анализ

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сайтов, А. В. Исследование погружения зерна потоком в жидкость различной плотности методами планирования эксперимента / А. В. Сайтов, В. А. Сысуев, В. Е. Сайтов. – DOI [10.15507/2658-4123.031.202103.414-429](https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.414-429) // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 3. – С. 414–429.

© Сайтов А. В., Сысуев В. А., Сайтов В. Е., 2021



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

Studying Grain Flow Immersion into Liquids of Various Densities Based on the Methods of Experiment Design

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

^a*Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (Kirov, Russian Federation)*

^b*Vyatka State Agricultural Academy (Kirov, Russian Federation)*

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

Introduction. In addition to grain, a grain heap of rye may contain poisonous *ergot sclerotia*. Modern grain cleaning machines do not isolate *ergot sclerotia* in one technological process because of the similarity of physical properties in linear dimensions. Isolation of *ergot sclerotia* from rye grain in one technological process is possible through the use of aqueous solutions of inorganic salts. The purpose of the study is to determine the optimum elevation of the loading hopper relative to the liquid surface. The data obtained contribute to increasing the quality of the technological process of the machine being developed.

Materials and Methods. The paper considers the delivery of rye grain flow from the loading hopper outlet into the liquid by varying the specific grain load, liquid density and the delivery height. To set up the experiments, the experiment design methods have been used. The experimental data have been processed using the statistical package Statgraphics Plus 5.1.

Results. The estimation of the effective elevation of the loading hopper outlet relative to the liquid surface when delivering grain flow has been carried out. There have been obtained regression models for the fraction of grains, which did not submerge and rose up to the liquid surface with air bubbles.

Discussion and Conclusion. It has been found that the density of the aqueous salt solution has a significant effect on the percentage of grains, which did not submerge and rose up to the liquid surface with air bubbles. The smallest values of at different density of the liquid and specific grain load are achieved at a grain delivery height $56.0 \cdot 10^{-3}$ m.

Keywords: grain of winter rye, ergot sclerotia, experimental design method, aqueous salt solution, liquid surface tension, analysis of variance

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Saitov A.V., Sysuev V.A., Saitov V.E. Studying Grain Flow Immersion into Liquids of Various Densities Based on the Methods of Experiment Design. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(3):414-429. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202103.414-429>

Введение

Посевы озимой ржи в период цветения заражаются спорами спорыньи. При созревании колосьев в них вместо зерен образуются склероции гриба *Claviceps purpurea tul.* (спорынья), которые ядовиты [1; 2]. При попадании с продуктами питания в организм человека или животного они вызывают ряд заболеваний [3–5].

При уборке урожая ржи современными зерноуборочными комбайнами

в зерновом материале могут содержаться ядовитые склероции из-за несовершенства системы очистки комбайна [6–8]. Большинство склероциев имеют такой же цвет, линейные размеры и парусность, что и зерно ржи. Их коэффициент внутреннего скольжения также сопоставим [9–12].

Поэтому для отделения *Claviceps purpurea tul.* требуется многократный пропуск зернового материала через очистительные механизмы

зерноочистительного пункта [13–16]. Это обстоятельство значительно повышает затратность технологического процесса очистки зерна от примесей [17–19]. Совершенствование конструкции машин не решает данную проблему [20–23].

В то же время склерозии имеют меньшую плотность по сравнению с полновесным зерном ржи. Данное отличие позволяет разделять их по этому критерию. Можно использовать способ выделения примесей в водном растворе неорганической соли, что поможет отделить склерозии от зерна за один технологический процесс [23]. Затраты на него незначительны по сравнению с работой зерноочистительных машин. Для отделения *Claviceps purpurea tul.* в водном растворе предложено устройство, для привода которого требуется электродвигатель небольшой мощности [24].

Для отделения ядовитых склероциев гриба необходимо определить высоту расположения выпускного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости различной плотности $\rho_{\text{ж}}$. Цель исследования – найти данные параметры.

Обзор литературы

Результаты экспериментальных исследований по падению тела в жидкость приводятся в работах ряда ученых¹ [25–28]. Отмечается, что при погружении тела в жидкость происходит захват и увлечение за собой пузырька воздуха. Отрываясь от тела, пузырек воздуха всплывает на поверхность жидкости, при этом образуется кумулятивный эффект в виде всплеска столбика воды.

Процессы, происходящие при погружении в воду стального шарика диаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м, совпадающего по линейному размеру длины с большинством зерновок ржи, представлены в работе В. В. Майера². В результате погружения процесс, описанный выше, повторяется.

Очевидно, что захват пузырька воздуха зерновкой очищаемого материала и образование при этом кумулятивного эффекта будет ухудшать отделение ядовитых склероциев и увеличивать потери зерна.

Рассматривается падение отдельных зерен ржи, пшеницы, ячменя и овса, подверженных заражению ядовитой спорыньей, в жидкость различной плотности. Обосновано, что высота установки загрузочного бункера для преодоления поверхностного натяжения жидкости всеми зерновками должна составлять $57,1 \cdot 10^{-3}$ м [29; 30].

Представлены результаты практических опытов по бросанию единичных зерен озимой ржи сорта «Фаленская 4» в жидкость плотностью 1 000, 1 090 и 1 150 кг/м³. Установлено, что стопроцентное погружение зерен в воду происходит при высоте не менее $43 \cdot 10^{-3}$ м, а в водный раствор соли – $58 \cdot 10^{-3}$ м [31].

Однако при разработке устройства нужно учесть, что движение зерна будет происходить потоком, и исключить появление нежелательного захвата пузырька воздуха зерновкой, который будет ухудшать результаты отделения примесей от зерна и увеличивать потери зерна.

¹ Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Взаимодействие упругих конструкций с жидкостью (удар и погружение). Л.: Судостроение, 1978. 200 с.; Shibue T., Ito A., Nakayama E. Structural Response Analysis of Cylinders under Water Impact // Proceedings of the International Conference “Hydroelasticity in Marine Technology”. Trondheim, 1994. Pp. 221–228. URL: <https://www.tib.eu/en/search/id/BLCF:CN005619750/Structural-response-analysis-of-cylinders-under?cHash=1cb62d3b58e5ff39bc8e9d11ebee3c52> (дата обращения: 10.04.2021).

² Майер В. В. Кумулятивный эффект в простых опытах. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. 192 с.

Материалы и методы

Определение эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера при погружении потоком зерна озимой ржи сорта «Фаленская 4» осуществлялось на экспериментальной установке, представленной на рисунке 1.

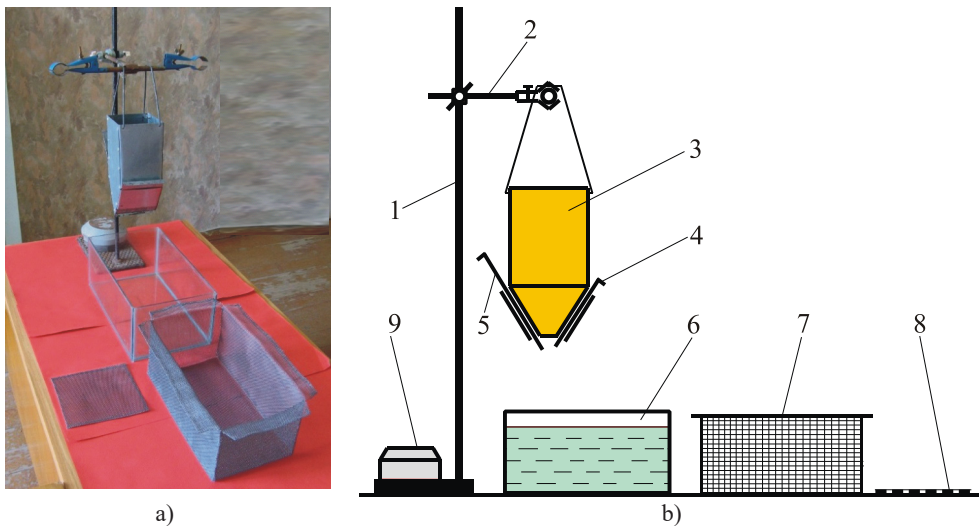
Экспериментальная установка для исследования состояла из лабораторного штатива 1, бункера 3 (патент № 2631556), ванны 6, сетки 8 для съема плавающих на поверхности раствора зерен и сита 7 для отделения зерен от раствора соли [32]. Лабораторный штатив оснащен противовесом 9 для придания устойчивости. На вертикальную стойку при помощи муфты с зажимными винтами закрепляется держатель 2, подвешивается бункер 3.

Процесс погружения зерна потоком в водный раствор соли заключается в следующем. Зерновой материал из бункера 3 подается потоком в ванну 6

с жидкостью различной плотности, в которой предварительно размещено сито 7. При поступлении материала в жидкость зерна, имеющие большую плотность, чем водный раствор соли, опускаются на дно ванны 6, а зерна с меньшей плотностью всплывают на поверхность раствора соли.

При варьировании h и удельной зерновой нагрузки $g_{уд}$, которое осуществляется открытием выпускного окна загрузочного бункера с помощью заслонки 4, потонувшие зерна могут всплывать на поверхность жидкости различной плотности с захваченными пузырьками воздуха. Зерна, оказавшиеся на поверхности, снимаются сеткой 8 для подсчета количества потонувших и всплывших зерен.

Зерно процеживается от водного раствора соли с помощью сита 7 из ванны 6 и раскладывается на просушку. Процесс может повторяться.



Р и с. 1. Экспериментальная установка для исследования погружения зерна потоком в жидкость различной плотности: а) общий вид установки; б) схема установки; 1 – лабораторный штатив; 2 – держатель; 3 – бункер; 4 – регулировочная заслонка; 5 – скатная плоскость; 6 – ванна; 7 – сито; 8 – сетка; 9 – противовес

Fig. 1. Experimental setup for studying the immersion of grain flow into liquid of different density: а) general view of the setup; б) scheme of the setup; 1 – laboratory stand; 2 – holder; 3 – bunker; 4 – adjusting flap; 5 – pitched plane; 6 – bath; 7 – sieve; 8 – mesh; 9 – counterweight

Отношение непотонувших и всплывших с пузырьками воздуха зерен к числу брошенных зерен определяется по формуле (%):

$$P_3 = \frac{n_2}{n_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где n_1 – количество зерен, поступающих в жидкость различной $\rho_{\text{ж}}$, 10 000 шт.; n_2 – количество зерен, оказавшихся на поверхности жидкости различной $\rho_{\text{ж}}$, шт.

При определении эффективной высоты h использовался метод планирования эксперимента [30]. В результате реализации плана эксперимента получены регрессионные модели. Для исключения гипотезы о случайной природе значения коэффициентов уравнения проводилось сравнение расчетного P -уровня значимости с принятым уровнем значимости, равным 0,05. Также осуществлялось сопоставление расчетных значений F -статистики ($F_{\text{расч}}$) коэффициентов уравнения с табличным значением F -критерия Фишера ($F_{\text{табл}}$) для уровня значимости $\alpha = 0,05$ при числе степеней свободы $k_1 = m$, $k_2 = n - m - 1$ (n – число проведенных опытов, m – количество факторов)³. Оценку полученной адекватной математической модели рабочего процесса поточного погружения зерна производили с помощью сравнения фактических значений с расчетными скорректированным коэффициентом множественной детерминации R^2_c (R -squared (adjusted for d.f.)). Точность регрессионной модели определялась через стандартную ошибку оценки (Standard error of est.) и среднюю абсолютную ошибку (Mean absolute error).

Для автокорреляции между опытными данными использовался критерий Durbin – Watson statistic (DW) и остаточная автокорреляция (Lag 1 residual autocorrelation). Изучение полученной адекватной регрессионной модели осуществлялось с помощью трехмерных графиков поверхности отклика, созданных в CorelDRAW 12⁴ [30].

Результаты исследования

Для оценки эффективной высоты расположения выпускного отверстия загрузочного бункера h относительно поверхности жидкости при погружении зерна ржи потоком в воду ($\rho_{\text{ж}} = 1\,000$ кг/м³) и водный раствор соли (NaCl) ($\rho_{\text{ж}} = 1\,090$ кг/м³) и варьировании удельной зерновой нагрузки $g_{\text{уд}}$ были предварительно проведены однофакторные опыты на экспериментальной установке (рис. 1).

Доказано, что с увеличением $g_{\text{уд}}$ при любом фиксированном значении h доля зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды P_{31000} и водного раствора соли P_{31090} , возрастает. При этом между исследуемыми параметрами существует нелинейная связь, а поверхность отклика P_{31090} несет такую же информацию, что и поверхность отклика P_{31000} . Однако значения P_{31090} возрастают на порядок, вследствие повышения коэффициента поверхностного натяжения водного раствора соли, по сравнению с водой, для преодоления которой зерновому потоку требуется большая высота подачи h . Минимальные значения P_{31000} и P_{31090} фиксируются в области $h = (40,0 \dots 80,0) \cdot 10^{-3}$ м при любой $g_{\text{уд}}$ [30].

Для определения оптимальных параметров h , $g_{\text{уд}}$ и $\rho_{\text{ж}}$ применен почти

³ Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике. Ульяновск: УлГТУ, 2008. 139 с.

⁴ STATGRAPHICS Plus 5.1 [Электронный ресурс]. URL: <https://statgraphics-plus.updatestar.com/> (дата обращения: 21.04.2020); Сысоев В. А. Энергосберегающие машины и оборудование для кормоприготовления: исследования методами планирования эксперимента. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 1999. 294 с.



ротатабельный план Бокса – Бенкина второго порядка⁵. Кодированные обозначения исследуемых факторов представлены в таблице. Уровни факторов и их интервалы варьирования выбраны, исходя из предварительных исследований.

После обработки опытных данных с помощью статистического пакета Statgraphics Plus 5.1, полученных в результате реализации матрицы планирования эксперимента, создана регрессионная модель для доли зерен P_3 (Var_1), непотонувших и всплывших на поверхность водного раствора соли⁶:

$$P_3 = 3,1 + 0,363x_1 + 0,688x_2 + 2,9x_3 - 0,875x_1x_2 + 0,1x_1x_3 + 0,25x_2x_3 + 1,163x_1^2 + 1,363x_2^2 + 0,038x_3^2. \quad (2)$$

Однако в полученной регрессионной модели (2) $F_{\text{расч}}$ четырех коэффициентов регрессии при x_1 (A), x_1x_3 (AC), x_2x_3 (BC), x_3x_3 (CC) составляет 2,41, 0,09, 0,57, 0,01 соответственно. $F_{\text{расч}}$ этих ко-

эффициентов регрессии меньше $F_{\text{табл}}$, который для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы $k_1 = 3$, $k_2 = 11$ составляет 3,59 ($F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}$). Статистическая незначимость данных четырех коэффициентов регрессии также подтверждается тем, что их P -уровень значимости (P -Value) больше принятого уровня значимости ($P_{x_1(A)} = 0,1814 > 0,05$; $P_{x_1x_3(AC)} = 0,7743 > 0,05$; $P_{x_2x_3(BC)} = 0,4833 > 0,05$ и $P_{x_3x_3(CC)} = 0,9174 > 0,05$).

Графическая интерпретация значимости коэффициентов регрессии выражения (2), в сравнении с табличным значением t -критерия Стьюдента ($t_{\text{табл}}$), приведена также на рисунке 2а.

На графике нанесена вертикальная линия, которая при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $n = 5$ соответствует $t_{\text{табл}}$, равному 2,57. Расчетные значения t -статистики только пяти коэффициентов регрессии при x_3 (C), x_2 (B), x_2x_2 (BB), x_1x_1 (AA) и x_1x_2 (AB) больше табличного значения t -критерия Стьюдента ($t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$).

Т а б л и ц а

T a b l e

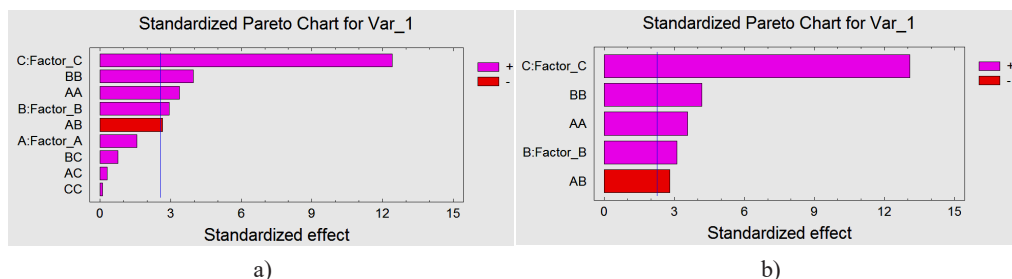
Исследуемые факторы, их обозначения, единицы измерения, уровни и интервалы варьирования

The investigated factors, their designations, units of measurement, levels and intervals of variation

Исследуемый фактор / The investigated factor	Обозначение / Designation	Единица измерения / Unit	Кодированное обозначение / Coded designation	Уровни / Levels			Интервал / Interval
				-1	0	+1	
Высота расположения загрузочного бункера / Elevation of the loading hopper	h	10^{-3} м / 10^{-3} m	x_1 (Factor_A)	20,000	80,000	140,000	60,000
Удельная зерновая нагрузка / Specific grain load	$g_{\text{уд}}$	кг/(с·м) / kg/(s·m)	x_2 (Factor_B)	0,674	3,948	7,221	3,274
Плотность жидкости / Density of liquid	$\rho_{\text{ж}}$	10^3 кг/м ³ / 10^3 kg/m ³	x_3 (Factor_C)	1,000	1,090	1,180	0,090

⁵ Там же.

⁶ STATGRAPHICS Plus 5.1; Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике.



Р и с. 2. Статистическая значимость коэффициентов регрессии исследуемого критерия оптимизации P_3 (Var_1) в сравнении с табличным значением t -критерия Стьюдента: а) до исключения незначимых коэффициентов регрессии; б) после исключения незначимых коэффициентов регрессии

Fig. 2. The statistical significance of the regression coefficients of the investigated criterion for the optimization P_3 (Var_1) in comparison with the tabular value of the Student's t -test: а) until the exclusion of insignificant regression coefficients; б) after excluding insignificant regression coefficients

Это подтверждает статистическую значимость данных коэффициентов модели регрессии (2).

Тогда, в результате исключения незначимых коэффициентов регрессии из выражения (2) математическая модель рабочего процесса погружения зерна потоком в водный раствор соли описывается следующим уравнением:

$$P_3 = 3,123 + 0,688x_2 + 2,9x_3 - 0,875x_1x_2 + 1,159x_1^2 + 1,359x_2^2. \quad (3)$$

В полученной регрессионной модели (3) $F_{\text{расч}}$ всех коэффициентов регрессии (F -Ratio = 7,81–171,59) больше значения $F_{\text{табл}}$, который для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы ($k_1 = 3$; $k_2 = 11$) составляет 3,59 ($F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$). Статистическая значимость данных пяти коэффициентов регрессии также подтверждается тем, что их P -уровень (P -Value), имеющий значения 0,00001–0,02090, меньше принятого (P -Value < 0,05). Графическая интерпретация значимости коэффициентов регрессии, в сравнении с табличным значением t -критерия Стьюдента, приведена на рисунке 2б. На графике $t_{\text{табл}}$ для уровня значимо-

сти $\alpha = 0,05$ и числа степеней свободы $n = 9$ составляет 2,26 (вертикальная линия). Расчетные значения t -статистики всех коэффициентов регрессии больше табличного значения t -критерия Стьюдента ($t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$). Поэтому гипотеза о случайной природе значений коэффициентов регрессии исключается.

Из полученного уравнения (3) следует, что на показатели P_3 , по сравнению с $g_{\text{уд}}(x_2)$ и $h(x_1)$, оказывает влияние $\rho_{\text{ж}}(x_3)$. Достоверность полученной регрессионной модели выражается малыми отклонениями фактических значений от расчетных $|P_3 - \bar{P}_3|$, составляющих по модулю 0,0230–1,0798 %. Скорректированный коэффициент множественной детерминации R^2_c показывает, что 93,8 % изменения функции $P_3 = f(h, g_{\text{уд}}, \rho_{\text{ж}})$ объясняется вариацией ее переменных $h, g_{\text{уд}}$ и $\rho_{\text{ж}}$. Остальные 6,2 % изменения функции $P_3 = f(h, g_{\text{уд}}, \rho_{\text{ж}})$ объясняются факторами, не учтенными в принятой модели. Полученную регрессионную модель можно считать достаточно качественной. Стандартная ошибка оценки модели регрессии показывает стандартное отклонение остатков, которые составляют незначительную величину 0,626, что говорит о точности регрессионной модели. Средняя абсолютная ошибка,

характеризующая величину, на которую теоретические значения, рассчитанные по модели, в среднем отклоняются от фактических, имеет малое значение, равное 0,340. Это также свидетельствует о высокой точности полученной регрессионной модели. Показатель DW составляет 2,588. Признаков последовательной автокорреляции между опытными данными нет, поскольку P -значение, равное 0,0832, больше 0,05. Это подтверждает остаточная автокорреляция 0,295, близкая к нулю. Следовательно, полученная регрессионная модель (3) адекватно описывает реальный процесс, а потому значима и способна характеризовать P_3 на поверхности жидкости различной $\rho_{ж}$ при поточном погружении в результате варьирования значений h , $g_{уд}$ и $\rho_{ж}$.

Для анализа адекватной регрессионной модели (3) использована объемная графика поверхности отклика при фиксировании на нулевом уровне факторов $x_1(h)$, $x_2(g_{уд})$ и $x_3(\rho_{ж})$. Поверхности отклика представлены на рисунке 3.

При фиксировании фактора $x_3(\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3)$ на нулевом уровне поверхность отклика (рис. 3а) показывает, что при $h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ($x_1 = -1$) доля P_3 при наименьшей $g_{уд} = 0,674\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = -1$) составляет 4,079 %, а с повышением $g_{уд}$ значение P_3 увеличивается и при $g_{уд} = 7,221\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = 1$) равно 7,205 %. Это обусловлено тем, что значительное количество зерен не может преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости с такой высоты.

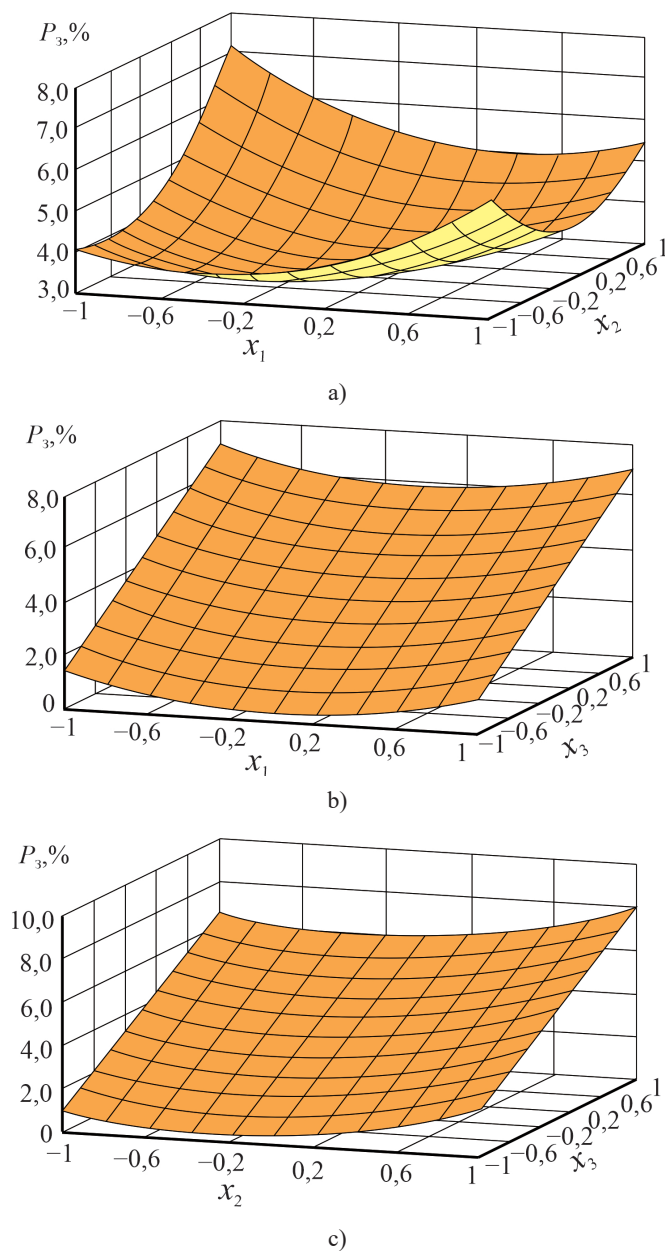
Повышение h (x_1) вызывает возрастание критерия P_3 , который при $h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ($x_1 = 1$) и $g_{уд} = 0,674\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = -1$) составляет 5,829 %, а при данной высоте h и $g_{уд} = 7,221\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = 1$) равен 5,460 %. Это обусловлено захватом зернами пузырьков воздуха, группированием в комочки и активным всплытием на поверхность раствора.

Область минимальных значений P_3 наблюдается при $h =$

$(44,0-80,0) \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ($x_1 = -0,6 \dots 0,2$) и $g_{уд} = 0,674-3,412\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = -1 \dots -0,2$), которые составляют 3,051–3,388 %. Причем при $h = 56,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ($x_1 = -0,4$) и $g_{уд} = 1,359-3,412\ \text{кг/(с·м)}$ ($x_2 = -0,4 \dots -0,6$) фиксируются минимальные значения P_3 , которые составляют 3,111 и 3,176 % соответственно, что обуславливается исключением захвата пузырьков воздуха зернами.

При фиксировании на нулевом уровне фактора x_2 ($g_{уд} = 3,948\ \text{кг/(с·м)}$) поверхность отклика функции $P_3 = f(h, \rho_{ж})$ (рис. 3б) показывает, что при любом значении h (x_1) с увеличением $\rho_{ж}$ (x_3) значения P_3 возрастают. При этом значения анализируемой переменной P_3 в угловых точках $x_1 = -1$ ($h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$) и $x_3 = -1$ ($\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3$), а также $x_1 = 1$ ($h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$) и $x_3 = -1$ ($\rho_{ж} = 1\ 090\ \text{кг/м}^3$) составляют 1,383 %. При показателях $x_1 = -1$ ($h = 20,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$) и $x_3 = 1$ ($\rho_{ж} = 1\ 180\ \text{кг/м}^3$), а также $x_1 = 1$ ($h = 140,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$) и $x_3 = 1$ ($\rho_{ж} = 1\ 180\ \text{кг/м}^3$) значение P_3 равно 7,183 %. При этом наименьшие показатели P_3 фиксируются в области варьирования h , равной $(56,0 \dots 92,0) \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ ($x_1 = -0,4 \dots 0,2$), которые при $\rho_{ж} = 1\ 000\ \text{кг/м}^3$ ($x_3 = -1$) составляют 0,409–0,269 % соответственно, а при увеличении плотности $\rho_{ж}$ (x_3) жидкости показатели P_3 имеют меньшие значения по сравнению с его угловыми точками. Это связано с тем, что зерна не могут преодолеть силу поверхностного натяжения жидкости при h (x_1) менее $56,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$. При h (x_1) более $92,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$ происходит захват зернами пузырьков воздуха и всплытие их на поверхность раствора.

Поверхность отклика для функции $P_3 = f(g_{уд}, \rho_{ж})$ (рис. 3с), полученная при фиксировании фактора x_1 ($h = 80,0 \cdot 10^{-3}\ \text{м}$) на нулевом уровне, несет идентичную информацию, что и поверхность отклика количества $P_3 = f(h, \rho_{ж})$ (рис. 3б) при фиксировании на нулевом уровне



Р и с. 3. Поверхности отклика, характеризующие долю P_3 (Var_1) зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды и водного раствора соли:

а) при $x_1 (h) = 0$; б) при $x_2 (g_{yd}) = 0$; в) при $x_3 (\rho_{ж}) = 0$

F i g. 3. Response surfaces characterizing the fraction P_3 (Var_1) of grains, which did not submerge and rose to the liquid surface of water and aqueous salt solution:

а) at $x_1 (h) = 0$; б) at $x_2 (g_{yd}) = 0$; в) at $x_3 (\rho_{ж}) = 0$

фактора x_2 ($g_{уд} = 3,948$ кг/(с·м)). При этом с повышением $g_{уд}$ (x_2) и $\rho_{ж}$ (x_3) значения P_3 возрастают. Так, при $x_2 = -1$ ($g_{уд} = 0,674$ кг/(с·м)) и $x_3 = -1$ ($\rho_{ж} = 1\,000$ кг/м³) значение P_3 составляет 0,895 %, а с повышением $\rho_{ж}$ возрастает, и при $x_3 = 1$ ($\rho_{ж} = 1\,180$ кг/м³) $P_3 = 6,695$ %. Для $x_2 = 1$ ($g_{уд} = 7,221$ кг/(с·м)) и $x_3 = -1$ ($\rho_{ж} = 1\,000$ кг/м³) значение P_3 уже составляет 2,270 %, а при $x_3 = 1$ ($\rho_{ж} = 1\,180$ кг/м³) $P_3 = 8,070$ %. Наименьшие показатели P_3 с увеличением $\rho_{ж}$ фиксируются в области варьирования $g_{уд}$ (x_2) = 0,674–3,412 кг/(с·м) ($x_2 = -1 \dots -0,2$), которая при $\rho_{ж} = 1\,000$ кг/м³ ($x_2 = -1$) составляют 0,895–0,140 % соответственно, а при $\rho_{ж} = 1\,180$ кг/м³ ($x_2 = -0,2$) равна 6,695–5,940 % соответственно. Повышение доли P_3 на поверхности жидкости с увеличением $g_{уд}$ (x_2) связано с тем, что ядро более плотного зернового потока, создавая каверну, увлекает за собой воздушный пузырь, который затем всплывает на поверхность жидкости, увлекая за собой часть зерна. Повышение $\rho_{ж}$ также вызывает увеличение значения P_3 .

Обсуждение и заключение

Таким образом, из результатов проведенных исследований погружения зерна озимой ржи сорта «Фаленская 4» потоком в жидкость различной плотности $\rho_{ж}$, следует, что на показатели P_3 , по сравнению с $g_{уд}$ (x_2) и h (x_1), существенное влияние оказывает $\rho_{ж}$ (x_3). С увеличением $\rho_{ж}$ (x_3) значения P_3 возрастают. При этом наименьшие значения доли P_3 зерен, непотонувших и всплывших на поверхность воды и водного раствора соли с пузырьками воздуха, при разных $\rho_{ж}$ и $g_{уд}$ достигаются при высоте подачи зерна $h = 56,0 \cdot 10^{-3}$ м, что согласуется с теоретическими исследованиями [30; 31]. При этом значении h не происходит нежелательный захват пузырьков воздуха зернами при поточном погружении в жидкость. Это определяет повышение качества технологического процесса разрабатываемой машины. С точки зрения конструкционной целесообразности при разработке машины необходимо принять высоту расположения выпускного отверстия загрузочного бункера h над поверхностью водного раствора соли $60,0 \cdot 10^{-3}$ м.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Щеклеина, Л. М. Проблема спорыньи злаков (*Claviceps purpurea* (fr.) tul.): история и современность (обзор) / Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова. – DOI 10.25750/1995-4301-2013-1-005-012 // Теоретическая и прикладная экология. – 2013. – № 1. – С. 5–12. – Рез. англ.
2. Шешегова, Т. К. Иммунологическая характеристика сортов озимой ржи / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина, Е. И. Уткина. – DOI 10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2018. – Т. 65, № 4. – С. 30–35. – Рез. англ.
3. Щеклеина, Л. М. Вредоносность спорыньи на новых сортах озимой ржи в Кировской области / Л. М. Щеклеина, Т. К. Шешегова. – DOI 10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89 // Вестник Марийского государственного университета. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 83–90. – Рез. англ.
4. Щеклеина, Л. М. Влияние погодных факторов на отдельные периоды развития гриба *Claviceps purpurea* (Fr.) Tul и уровень вредоносности спорыньи в Кировской области / Л. М. Щеклеина. – DOI 10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143 // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2019. – Т. 20, № 2. – С. 134–143. – Рез. англ.
5. Устойчивость сортов ржи к спорынье и содержание эргоалкалоидов в склероциях *Claviceps purpurea* в условиях Кировской области / Т. К. Шешегова, Л. М. Щеклеина,

В. П. Желифонова [и др.]. – DOI [10.1134/S0026364819030127](https://doi.org/10.1134/S0026364819030127) // Микология и фитотерапия. – 2019. – Т. 53, № 3. – С. 177–182. – Рез. англ.

6. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process / V. I. Orobinsky, A. M. Gievsky, I. V. Baskhakov, A. V. Chernyshov. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.163](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163) // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). – 2018. – Pp. 870–874.

7. **Aldoshin, N.** Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze. – DOI [10.17221/107/2017-RAE](https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE) // Research in Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 64, Issue 4. – Pp. 209–214.

8. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester / N. Aldoshin, O. Didmanidze, N. Lysin, M. Mosyakov. – DOI [10.22616/ERDev2019.18.N110](https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110) // Proceedings of 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22–24 May 2019). – Jelgava, 2019. – Pp. 100–104.

9. **Волхонов, М. С.** Анализ состояния предварительной очистки зерна в хозяйствах Северо-Западного региона Российской Федерации и перспективы совершенствования / М. С. Волхонов, И. Б. Зимин, Ю. Н. Островский. – DOI [10.12737/2073-0462-2020-82-86](https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-82-86) // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2020. – Т. 15, № 2 (58). – С. 82–86. – Рез. англ.

10. Параметры и режимы очистки семян на вибропневматическом сепараторе усовершенствованной конструкции / В. Д. Галкин, А. Д. Галкин, В. А. Хандриков [и др.]. – DOI [10.24411/2307-2873-2020-10012](https://doi.org/10.24411/2307-2873-2020-10012) // Пермский аграрный вестник. – 2020. – № 1 (29). – С. 4–12. – Рез. англ.

11. Increase of Seed Cleaning Efficiency by Better Use of Air Stream Properties / V. E. Saitov, P. Savinych, W. Golka, J. Kamionka. – DOI [10.14654/ir.2015.155.139](https://doi.org/10.14654/ir.2015.155.139) // Agricultural Engineering. – 2015. – Issue 3. – Pp. 89–99.

12. Mathematical Modeling of the Grain Material Separation in the Pneumatic System of the Grain-Cleaning Machine / I. Badretdinov, S. Mudarisov, M. Tuktarov [et al.]. – DOI [10.5937/jaes17-22640](https://doi.org/10.5937/jaes17-22640) // Journal of Applied Engineering Science. – 2019. – Vol. 17, Issue 4. – Pp. 529–534.

13. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production / V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko, A. M. Gievsky [et al.]. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.159](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159) // Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). – 2018. – Pp. 849–852.

14. **Гиевский, А. М.** Пути повышения производительности универсальных зерноочистительных машин / А. М. Гиевский, В. А. Гулевский, В. И. Оробинский. – DOI [10.26897/1728-7936-2018-3-12-16](https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-12-16) // Вестник ФГОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». – 2018. – № 3 (85). – С. 12–16. – Рез. англ.

15. **Saitov, V. E.** Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines / V. E. Saitov, R. F. Kurbanov, A. N. Suvorov. – DOI [10.1016/j.proeng.2016.06.728](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728) // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 150. – Pp. 107–110.

16. Development and Theoretical Studies of Grain Cleaning Machine for Fractional Technology of Flattening Forage Grain / P. Savinyh, Y. Sychugov, V. Kazakov, S. Ivanovs. – DOI [10.22616/ERDev2018.17.N156](https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156) // Proceedings of the 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23–25 May 2018). – Jelgava, 2018. – Pp. 124–130.

17. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds / A. M. Gievskiy, V. I. Orobinsky, A. P. Tarasenko [et al.]. – DOI [10.1088/1757-899X/327/4/042035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 327, Issue 4.

18. Research of a Diametrical Fan with Suction Channel / V. E. Saitov, V. G. Farafonov, R. G. Gataulin, A. V. Saitov. – DOI [10.1088/1757-899X/327/4/042035](https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 473.

19. **Ермолев, Ю. И.** Моделирование процесса сепарации измельченного соломистого вороха в пневмосепараторе с тремя пневмоканалами / Ю. И. Ермолев, А. А. Дорошенко, С. В. Белов. – DOI [10.12737/19691](https://doi.org/10.12737/19691) // Вестник Донского государственного технического университета. – 2016. – Т. 16, № 2. – С. 59–68. – Рез. англ.
20. Исследование эффективности очистки вороха яровой пшеницы для семенных целей с помощью воздушно-ситового сепаратора / В. И. Орбинский, А. М. Гиевский, А. П. Тарасенко [и др.]. – DOI [10.17238/issn2071-2243.2019.2.34](https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.2.34) // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019. – Т. 12, № 2. – С. 34–42.
21. Studying the Design and Operational Parameters of the Sieve Module of the Grain Cleaning Machine / M. K. Kharitonov, A. M. Gievsky, V. I. Orobinsky. – DOI [10.1088/1755-1315/488/1/012021](https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012021). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 488.
22. **Astanakulov, K. D.** Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms / K. D. Astanakulov, Y. Z. Karimov, G. Fozilov // Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2011. – Vol. 42, Issue 4. – С. 37–40. – URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123047308> (дата обращения: 10.04.2021).
23. **Saitov, V. E.** Experimental Substantiation of the Effective Height of a Grain Falling by a Stream of Liquid in an Ergot Release Device / V. E. Saitov, V. G. Farafonov, A. V. Saitov. – DOI [10.1088/1755-1315/341/1/012123](https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012123). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 341.
24. Патент № 2689470 Российская Федерация, МПК В03В 5/48, В02В 1/04. Машина для отделения спорыньи от семян ржи : № 2018136461/03 : заявл. 15.10.2018 : опубл. 28.05.2019 / Сайтов А. В., Гатауллин Р. Г., Сайтов В. Е. ; заявитель и патентообладатель Сайтов А. В. – 12 с. – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1_20190528 (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.
25. **Архипов, В. А.** Образование вторичных капель при ударном взаимодействии капли с поверхностью жидкости / В. А. Архипов, В. Ф. Трофимов // Прикладная механика и техническая физика. – 2005. – Т. 46, № 1. – С. 55–62. – URL: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/90c/90cb0d4f0081d8015dacf0baf07ff566.pdf> (дата обращения: 10.04.2021).
26. **Комаров, А. А.** Падение тела в резервуар с жидкостью и расчет возникающих при этом динамических нагрузок / А. А. Комаров, В. В. Казеннов. – DOI [10.22227/1997-0935.2014.5.135-143](https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143) // Вестник МГСУ. – 2014. – № 5. – С. 135–143. – Рез. англ.
27. **Scolan, Y.-M.** Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid / Y.-M. Scolan, A. A. Korobkin. – DOI [10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4) // Journal of Fluids and Structures. – 2003. – Vol. 17, Issue 2. – Pp. 275–286.
28. **Scolan, Y.-M.** Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory: Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem / Y.-M. Scolan, A. A. Korobkin. – DOI [10.1016/j.crme.2012.09.006](https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006) // Comptes Rendus Mécanique. – 2012. – Vol. 340, Issue 10. – Pp. 702–705.
29. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia / V. A. Sysuev, V. E. Saitov, V. G. Farafonov [et al.]. – DOI [10.3103/S1068367417030156](https://doi.org/10.3103/S1068367417030156) // Russian Agricultural Sciences. – 2017. – Vol. 43, Issue 3. – Pp. 273–276.
30. **Сайтов, В. Е.** Теоретическое обоснование высоты расположения выхода загрузочного бункера в машине выделения вредных примесей мокрым способом / В. Е. Сайтов, В. Г. Фарафонов, А. В. Сайтов. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202003.355-376](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 355–376. – Рез. англ.
31. **Saitov, A. V.** The Relative Frequency of Immersion of Rye Grains in Liquid / A. V. Saitov, V. G. Farafonov, V. E. Saitov. – DOI [10.1088/1755-1315/723/2/022078](https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022078). – Текст : электронный // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 723.
32. Патент № 2631556 Российская Федерация, МПК В65D 88/26. Бункер для сыпучих материалов : № 2016140581 : заявл. 14.10.2016 : опубл. 25.09.2017 / Сайтов В. Е., Фарафонов В. Г.,

Суворов А. Н., Сайтов А. В. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Вятская госуд. с.-х. академия». – URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1_20170925 (дата обращения: 10.04.2021). – Рез. англ.

Поступила 14.04.2021; одобрена после рецензирования 16.05.2021; принята к публикации 25.05.2021

Об авторах:

Сайтов Алексей Викторович, младший научный сотрудник лаборатории озимой ржи ФГБНУ «Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока имени Н. В. Рудницкого» (610007, Российская Федерация, г. Киров, ул. Ленина, д. 166а), аспирант инженерного факультета ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия» (610017, Российская Федерация, г. Киров, Октябрьский пр-т, д. 133), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexeysaitov@yandex.ru

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

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

Заявленный вклад соавторов:

А. В. Сайтов – обзор и анализ научных источников, проведение практических опытов, оформление графического материала.

В. А. Сысуев – формулирование основной концепции исследования и доработка текста.

В. Е. Сайтов – подготовка первоначального варианта текста и формирование выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. [The Ergot Problem of Grains (*Claviceps purpurea* (fr.) tul.): History and Modernity (overview)]. *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>
2. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Utkina E.I. Immunologic Characteristics of Winter Rye Varieties. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2018; 65(4):30-35. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.65.4.30-35>
3. Shchekleina L.M., Sheshhegova T.K. Spurred Rye Harmfulness on New Winter Rye Varieties in the Kirov Region. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo universiteta* = Vestnik Mari State University. 2018; 4(2):83-90. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30914/2411-9687-2018-4-2-83-89>
4. Shchekleina L.M. Influence of Weather Factors on Separate Periods of Fungus *Claviceps Purpurea* (Fr.) Tul Development and Level of Ergot Harmfulness in Kirov Region. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2019; 20(2):134-143. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.2.134-143>
5. Sheshhegova T.K., Shchekleina L.M., Zhelifonova V.P., et al. A Resistance of Rye Varieties to Ergot and Ergot Alkaloid Content in *Claviceps Purpurea Sclerotia* on the Kirov Region Environments.

Mikologiya i fitoterapiya = Mycology and Phytotherapy. 2019; 53(3):177-182. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S0026364819030127>

6. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskhakov I.V., Chernyshov A.V. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). 2018. Pp. 870-874. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163>

7. Aldoshin N., Didmanidze O. Harvesting Lupinus Albus Axial Rotary Combine Harvester. *Research in Agricultural Engineering*. 2018; 64(4):209-214. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.17221/107/2017-RAE>

8. Aldoshin N., Didmanidze O., Lylin N., Mosyakov M. Work Improvement of Air-and-Screen Cleaner of Combine Harvester. In: Proceedings of 18th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (22-24 May 2019). Jelgava; 2019. Pp. 100-104. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2019.18.N110>

9. Volhonov M.S., Zimin I.B., Ostrovskiy Yu.N. Analysis of the Status of Preliminary Grain Cleaning in Farms of the North-Western Region of the Russian Federation and Prospects for Improvement. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Vestnik of Kazan State Agrarian University. 2020; 15(2):82-86. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2020-82-86>

10. Galkin V.D., Galkin A.D., Khandrikov V.A., et al. Seed Purification Parameters and Modes by Improved Vibration-Pneumatic Separator. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2020; (1):4-12. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.24411/2307-2873-2020-10012>

11. Saitov V.E., Savinyh P., Golka W., Kamionka J. Increase of Seed Cleaning Efficiency by Better Use of Air Stream Properties. *Agricultural Engineering*. 2015; (3):89-99. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14654/ir.2015.155.139>

12. Badretdinov I., Mudarisov S., Tuktarov M., et al. Mathematical Modeling of the Grain Material Separation in the Pneumatic System of the Grain-Cleaning Machine. *Journal of Applied Engineering Science*. 2019; 17(4):529-534. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes17-22640>

13. Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., Gievsky A.M., et al. Improving the Mechanization of High-Quality Seed Production. In: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions For Agriculture” (AgroSMART 2018). 2018. Pp. 849-852. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.159>

14. Gievskiy A.M., Gulevskiy V.A., Orobinskiy V.I. Ways of Increasing Performance of Universal Grain Cleaning Machines. *Vestnik FGOU VPO “Moskovskiy gosudarstvennyy agroinzhenernyy universitet imeni V.P. Goryachkina”* = Moscow Goryachkin Agroengineering University Bulletin. 2018; (3):12-16. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.26897/1728-7936-2018-3-12-16>

15. Saitov V.E., Kurbanov R.F., Suvorov A.N. Assessing the Adequacy of Mathematical Models of Light Impurity Fractionation in Sedimentary Chambers of Grain Cleaning Machines. *Procedia Engineering*. 2016; 150:107-110. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.728>

16. 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 the 17th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development” (23-25 May 2018). Jelgava; 2018. Pp. 124-130. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev2018.17.N156>

17. Giyevskiy A.M., Orobinsky V.I., Tarasenko A.P., et al. Substantiation of Basic Scheme of Grain Cleaning Machine for Preparation of Agricultural Crops Seeds. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 327(4). (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>

18. Saitov V.E., Farafonov V.G., Gataullin R.G., Saitov A.V. Research of a Diametrical Fan with Suction Channel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 473. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/4/042035>

19. Yermolyev Yu.I., Doroshenko A.A., Belov S.V. Modeling of Milled Straw Heap Separation in Air-Flow Classifier with Three Pneumatic Ducts. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2016; 16(2):59-68. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.12737/19691>
20. Orobinskiy V.I., Gievskiy A.M., Tarasenko A.P., et al. [Study of the Efficiency of Spring Wheat Heap Purification for Seed Purposes with an Air Sieve Separator]. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Vestnik of Don State Technical University. 2019; 12(2):34-42. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2071-2243.2019.2.34>
21. Kharitonov M.K., Gievskiy A.M., Orobinskiy V.I. Studying the Design and Operational Parameters of the Sieve Module of the Grain Cleaning Machine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 488. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/488/1/012021>
22. Astanakulov K.D., Karimov Y.Z., Fozilov G. Design of a Grain Cleaning Machine for Small Farms. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 2011; 42(4):37-40. Available at: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123047308> (accessed 10.04.2021). (In Eng.)
23. Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Experimental Substantiation of the Effective Height of a Grain Falling by a Stream of Liquid in an Ergot Release Device. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019; 341. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/341/1/012123>
24. Saitov A.V., Gataullin R.G., Saitov V.Ye. Machine for Ergot Separation from Rye Seeds. Patent 2,689,470 Russian Federation. 2019 May 28. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2689470C1_20190528 (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)
25. Arkhipov V.A., Trofimov V.F. [Formation of Secondary Droplets by Impact Interaction of the Droplet with the Liquid Surface]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* = Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2005; 46(1):55-62. Available at: <https://www.sibran.ru/upload/iblock/90c/90cb0d4f0081d8015dacf0baf07ff566.pdf> (accessed 10.04.2021). (In Russ.)
26. Komarov A.A., Kazennov V.V. Body Drop into a Fluid Tank and Dynamic Loads Calculation. *Vestnik MGSU* = Monthly Journal on Construction and Architecture. 2014; (5):135-143. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2014.5.135-143>
27. Scolan Y.-M., Korobkin A. Energy Distribution from Vertical Impact of a Three-Dimensional Solid Body onto the Flat Free Surface of an Ideal Fluid. *Journal of Fluids and Structures*. 2003; 17(2):275-286. (In Eng.) DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(02\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(02)00118-4)
28. Scolan Y.-M., Korobkin A.A. Mixed Boundary Value Problem in Potential Theory: Application to the Hydrodynamic Impact (Wagner) Problem. *Comptes Rendus Mécanique*. 2012; 340(10):702-705. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2012.09.006>
29. Sysuev V.A., Saitov V.E., Farafonov V.G., et al. Theoretical Background of Calculation of the Parameters of the Device for Grain Cleaning from Ergot Sclerotia. *Russian Agricultural Sciences*. 2017; 43(3):273-276. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367417030156>
30. Saitov V.E., Farafonov V.G., Saitov A.V. Theoretical Underpinnings of the Parameters of Device for Cleaning Grain from Ergot Sclerotia. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):355-376. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.355-376>
31. Saitov A.V., Farafonov V.G., Saitov V.E. The Relative Frequency of Immersion of Rye Grains in Liquid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021; 723. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/723/2/022078>
32. Saitov V.Ye., Farafonov V.G., Suvorov A.N., Saitov A.V. Hopper for Bulk Materials. Patent 2,631,556 Russian Federation. 2017 September 25. Available at: https://yandex.ru/patents/doc/RU2631556C1_20170925 (accessed 10.04.2021). (In Russ., abstract in Eng.)

Submitted 14.04.2021; approved after reviewing 16.05.2021; accepted for publication 25.05.2021



About the authors:

Aleksey V. Saitov, Junior Researcher in the Winter Rye Laboratory, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation); Postgraduate Student of Engineering Faculty, Vyatka State Agricultural Academy (133 Oktyabrskiy Prospekt, Kirov 610017, Russian Federation), Researcher ID: B-7315-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0266-4727>, alexeysaitov@yandex.ru

Vasily A. Sysuev, Scientific Director, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), Academician of RAS, D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: B-8519-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1172-005X>, sisuev@mail.ru

Viktor E. Saitov, Senior Researcher of the Laboratory for Field Agriculture, Federal Agricultural Research Center of the North-East Named after N. V. Rudnitsky (166a Lenin St., Kirov 610007, Russian Federation), D.Sc. (Engr.), Professor, Researcher ID: B-6098-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5548-8483>, vicsait-valita@e-kirov.ru

Contribution of the authors:

A. V. Saitov – reviewing and analyzing scientific sources, conducting practical experiments, design graphic material.

V. A. Sysuev – formulating the main concept of the study and finalizing the text.

V. E. Saitov – writing the draft and drawing the conclusions.

All authors have read and approved the final manuscript.