

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2025. № 3 (80). С. 121–128.
Buryat Agrarian Journal. 2025;3(80):121–128.

ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ АПК TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT FOR AGROINDUSTRIAL SECTOR

Научная статья

УДК 631.33-026.68.01:632.981.22

doi: 10.34655/bgsha.2025.80.3.013

Теоретико-экспериментальные основы обоснования возможности применения пневматического высевающего аппарата для влагоудерживающих агрохимикатов

Сергей Владимирович Рыжий

Луганский государственный аграрный университет им. К.Е. Ворошилова, Луганск,
Россия

ryzhyy1983@mail.ru

Аннотация. В последние годы активно разрабатываются технологии локального внесения влагоудерживающих агрохимикатов (гидрогелей) совместно с посевом зерновых культур. Однако высокая гидрофильность этих материалов требует создания специализированного высевающего аппарата с герметичным влагоотталкивающим бункером для точного дозирования и сохранения заданной влажности агрохимиката. Для того чтобы задать необходимые параметры рабочих органов такого высевающего аппарата, необходимо теоретическое и экспериментальное обоснование их оптимальных значений. Цель исследования – экспериментальное определение физико-механических свойств гидрогеля – коэффициента и угла внутреннего трения при различной абсолютной влажности, а также динамического коэффициента трения скольжения по разным поверхностям. Методика включала измерения на приборе для определения внутреннего трения и установки «наклонная плоскость». Эксперимент проводился с абсолютной влажностью гидрогеля от 11 до 23 %. Отраженные в статье расчеты и результаты эксперимента показали, что с увеличением абсолютной влажности увеличиваются коэффициент и угол внутреннего трения гидрогеля. Кроме того, с повышением влажности гидрогеля увеличивается его адгезия, что делает невозможным точное дозирование агрохимиката при абсолютной влажности более 11%. Также по результатам исследования определен средний динамический коэффициент трения скольжения гидрогеля для разных поверхностей: резины – 0,430, слоя антигравия KUDO® (гравитекса) – 0,402, пластмассы – 0,202, стали оцинкованной крашеной – 0,170. Все расчеты и полученные результаты измерений и вычислений представлены в статье. Полученные данные использованы для обоснования материала рабочей поверхности конструкции пневматического высевающего аппарата с точным дозированием гидрогеля, а также могут использоваться при разработке математической модели процесса внесения в почву влагоудерживающих агрохимикатов.

Ключевые слова: физико-механические свойства; влагоудерживающие агрохимикаты; гидрогель; коэффициент; трение.

Theoretical and experimental basis for the feasibility of using a pneumatic seeding unit for moisture-retentive agrochemicals**Sergey V. Ryzhiy**

Lugansk State Agrarian University, Lugansk, Russia

ryzhyy1983@mail.ru

Abstract. In recent years, active development of technologies of localized application of moisture-retentive agrochemicals (hydrogels) during the sowing of grain crops has been noticed. However, the high hydrophilicity of these materials needs the creation of specialized seeding equipment with a sealed, water-repellent hopper to ensure precise dosing and maintaining specified moisture levels. To set the required parameters for the working parts of the seeding unit, theoretical and experimental justification of their optimal values is necessary. The purpose of the study is to experimentally determine the physical and mechanical properties of hydrogels - specifically the coefficient and angle of internal friction at varying moisture levels, as well as the dynamic coefficient of sliding friction across different surfaces. The methodology included performing measurements using an internal friction testing device and an "inclined plane" adjusting. The experiment was conducted with absolute moisture content of the hydrogel ranging from 11% to 23%. The calculations and experimental results presented in the article showed that as absolute moisture content increased, the hydrogel coefficient of internal friction and angle of internal friction also increased. Additionally, higher moisture levels in the hydrogel lead to increased adhesion, making precise dosing of the substance impossible at absolute moisture levels exceeding 11%. Additionally, the study determined the average dynamic coefficient of sliding friction of the hydrogel for different surfaces: rubber – 0,430, KUDO® anti-gravel coating (Gravitex) – 0,402, plastic – 0,202, and painted galvanized steel – 0,170. The article presents all calculations and the results of measurements obtained. The obtained data was used to substantiate the structure of a pneumatic seeding unit capable of precise hydrogel dosing. These data can also be utilized in the development of a mathematical model for the process of soil application of moisture-retentive agrochemicals.

Keywords: physical and mechanical properties; moisture-retentive agrochemicals; hydrogel; coefficient; friction.

Введение. Влагоудерживающие агрохимикаты (гидрогели) представляют собой трехмерные полимерные сети, которые являются гидрофильными и способны удерживать большое количество воды. Благодаря этим свойствам гидрогели находят важное применение в растениеводстве за счет способности удерживать водные растворы агрохимикатов в зоне растительной корневой системы [1].

Отечественными и зарубежными исследователями неоднократно обосновывалось положительное влияние гидрогелей на растения, особенно в условиях ограниченной влажности [2, 3, 4, 5].

На протяжении последних лет учеными активно ведутся теоретические исследования и практические разработки конструкций и машин для локального внесе-

ния гидрогеля совместно с посевом зерновых культур [6, 7, 8]. В частности В.А. Цепляевым и др., была предложена секция сеялки с устройством подачи гидрогеля для обогащения семян во время посева жидкими удобрениями [8].

Однако считаем, что, учитывая высокую гидрофильность влагоудерживающих агрохимикатов (в дальнейшем – ВУА), актуальным является создание высевающего аппарата пневматической сеялки с герметичным влаготталкивающим загрузочным бункером для сохранения установленной абсолютной влажности вносимого в почву влагоудерживающего агрохимиката и точного его дозирования, для чего необходимо теоретическое и экспериментальное обоснование оптимальных значений параметров рабочих органов

такого высевающего аппарата.

Цель исследования – экспериментально определить такие физико-механические свойства ВУА, как коэффициент и угол внутреннего трения при различной его абсолютной влажности, а также динамический коэффициент трения скольжения гидрогеля по различным поверхностям для обоснования возможности применения в инновационном пневматическом высевающем аппарате.

Материалы и методы исследования. Влагоудерживающий агрохимикат (гидрогель) при различной заданной влажности представляет собой сыпучий материал белого цвета. С повышением абсолютной влажности структура кристаллов преобразовывается и переходит в желеобразный вид, что приводит к существенному изменению показателей, влияющих на коэффициент и угол внутреннего трения.

Влажность ВУА в условиях лаборатории определялась при помощи прибора для измерения влажности Laserliner DampFinder. Кроме этого, в исследованиях использовался штангенциркуль электронный «DIGITAL CALIPER 0 – 150 mm» для определения диаметра отверстия воронки.

Учитывая, что природа взаимодей-

ствия частиц гидрогеля при перемещении коррелирует с их фрикционными свойствами, определяющимися коэффициентом внутреннего трения [9], а такой параметр, как угол внутреннего трения φ материала равен значению угла естественного откоса α , то равновесное состояние возможно лишь при равенности α и φ , то есть должно выполняться условие $\alpha = \varphi$.

Используя вышеизложенное утверждение, определим значение коэффициентов внутреннего трения по выражению:

$$f = 2h/(D-d), \quad (1)$$

где: h – высота насыпанного усеченного конуса материала, мм;

d – диаметр отверстия воронки, мм;

D – диаметр основания конуса, замеренный по четырем различным направлениям, мм.

Угол внутреннего трения определяем по выражению

$$\varphi = \arctg \bar{f} \quad (2)$$

Эксперимент проводился с трехкратной повторностью при разной абсолютной влажности гидрогеля $W_a = 11\%$, $W_a = 17\%$, $W_a = 23\%$ с заданным диаметром отверстия воронки $d = 12,7$ мм [10] на приборе для определения коэффициента и угла внутреннего трения в зависимости от абсолютной влажности ВУА (рис. 1).

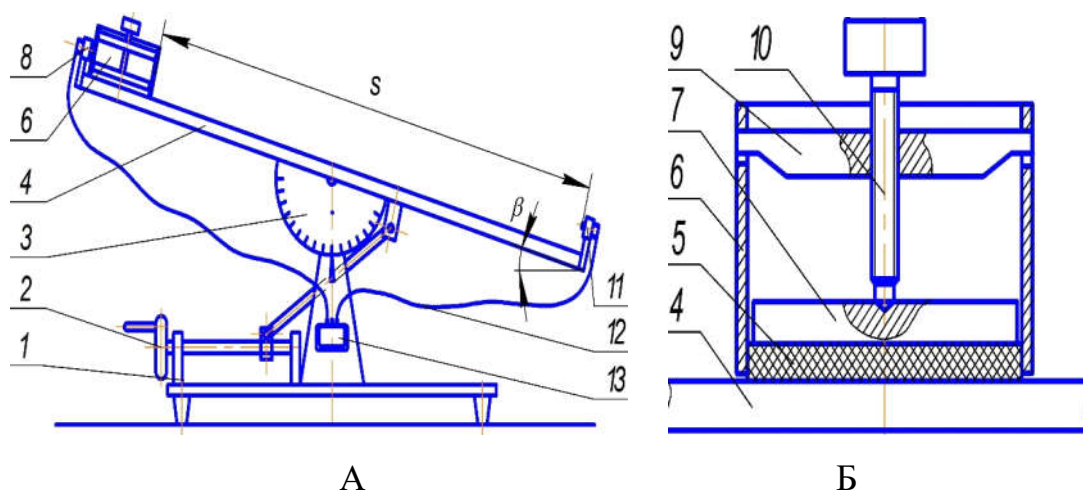


Рисунок 1. Прибор для определения коэффициента и угла внутреннего трения в зависимости от абсолютной влажности ВУА

Примечание. А – общий вид; Б – коробка с исследуемым материалом:

- 1 – платформа; 2 – поворотное устройство; 3 – измерительный сектор;
4 – наклонная плоскость; 5 – исследуемый материал; 6 – коробка; 7 – пята;
8, 11 – микровыключатели; 9 – планка; 10 – винт; 12 – провод; 13 – секундомер

Динамические коэффициенты трения скольжения ВУА по разнородным основаниям (по резине ГОСТ 7338-90, по слою антигравия KUDO®(гравитекс) ТУ 20.30.12-025-53934955-2017, по пластмассе ГОСТ 9.703-79, по стали оцинкован-

ной окрашенной) были определены по известным методикам нахождения коэффициентов трения [11, 12, 13] с использованием установки «наклонная плоскость» (рис. 2).

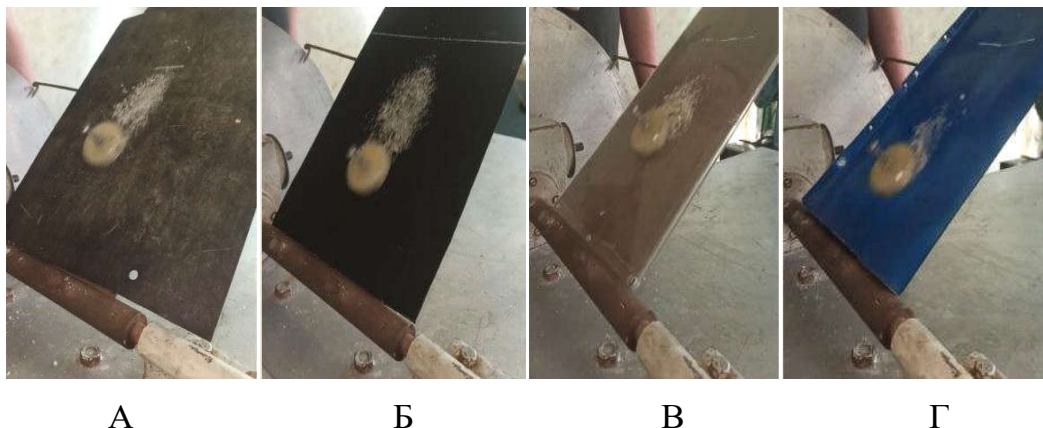


Рисунок 2. Установка «наклонная плоскость» для проведения эксперимента на разных поверхностях

Примечание. А – резина; Б – гравитекс; В – пластмасса; Г – сталь оцинкованная крашенная

По разным поверхностям ВУА (гидрогель) движется под действием силы, приведенной в выражении:

$$P = G \cdot \sin \beta - f_0 \cdot G \cos \beta \quad (3)$$

Следовательно, дифференциальное уравнение движения ВУА по наклонной плоскости будет иметь вид:

$$m \cdot S'' = m \cdot g \cdot \sin \beta - f_0 \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta, \quad (4)$$

где: m – масса тела;

S'' – ускорение тела (вторая производная от пути движения);

g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

f_0 – коэффициент трения скольжения (динамический).

После интегрирования и преобразования уравнение примет вид:

$$f_0 = \frac{tg\beta - \frac{2S}{gt^2 \cos \beta}}{g}, \quad (5)$$

где: S – путь движения материала по наклонной плоскости, $S = 0,25 \text{ м}$;

t – время движения материала, с;

β – угол наклона плоскости, превышающий β_0 , то есть $\beta > \beta_0$.

Эксперимент проводился с трехкратной повторностью при разных поверхно-

стях, каждая повторность на определенной поверхности имела свой заданный угол обрушения ВУА $\beta_1 = 37^\circ$; $\beta_2 = 39^\circ$; $\beta_3 = 41^\circ$, путь движения смеси составлял $S = 0,25 \text{ м}$, учитывалось t_{cp} – среднее время движения смеси, которое принимали для каждой поверхности, с, также учитывалась V – скорость движения смеси, м/с.

Результаты исследований и их обсуждения. В результате выполненных теоретико-экспериментальных исследований была обоснована возможность применения пневматического высевающего аппарата для влагоудерживающих агрохимикатов.

Полученные теоретико-экспериментальные значения изменения коэффициента и угла внутреннего трения в зависимости от абсолютной влажности (W_a) ВУА совместно с определенными результатами средних коэффициентов трения скольжения по различным поверхностям позволяют утверждать, что при увеличении абсолютной влажности (W_a) происходит увеличение высоты насыпного усеченного конуса ВУА (h), что объясняется повышением адгезии экспериментального материала (рис. 3).



А

Б

В

Рисунок 3. Результаты проведения эксперимента на приборе для определения коэффициента и угла внутреннего трения в зависимости от абсолютной влажности ВУА. Примечание. А – влажность $W_a = 11\%$; Б – влажность $W_a = 17\%$; В – влажность $W_a = 23\%$

Кроме этого, одновременно с повышением абсолютной влажности (W_a) ВУА значительно растет значение динамического коэффициента трения скольжения (f) и угол внутреннего трения ($\varphi_{гр}$).

Исходя из проведенных исследова-

ний, удалось получить средние коэффициенты внутреннего трения ($\bar{f}_c$), а также углы внутреннего трения ($\varphi_{град}$) в зависимости от абсолютной влажности влагоудерживающего агрохимиката (W_a) (рис. 4) [14].

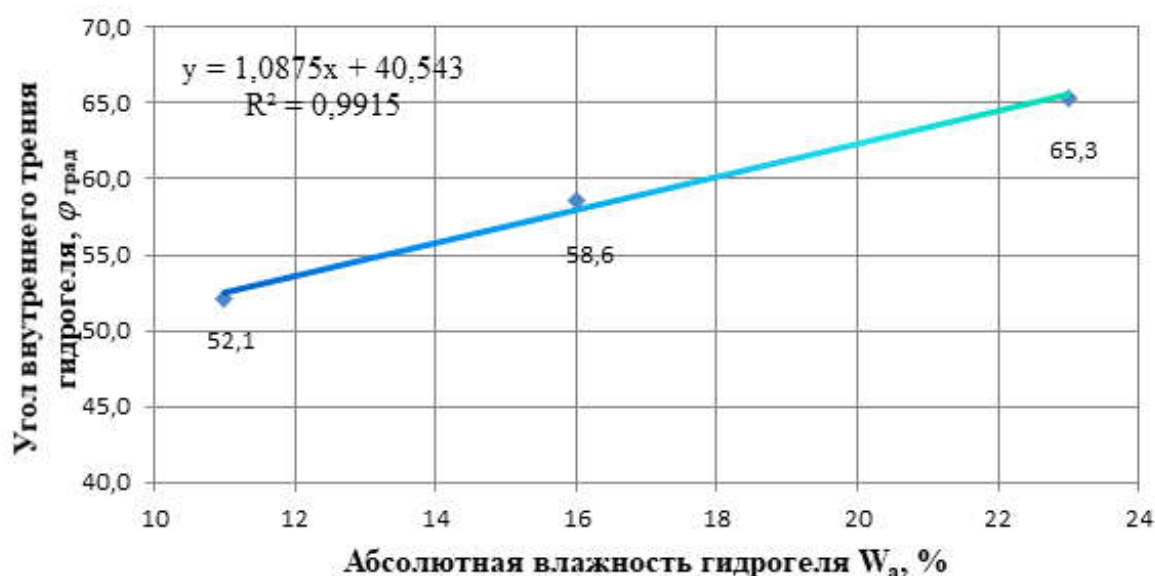


Рисунок 4. Зависимость угла внутреннего трения от абсолютной влажности ВУА

Наш особый интерес вызвало поведение гранул с постоянной абсолютной влажностью ВУА 11%, так как с повышением влажности гидрогеля становится невозможным его точное дозирование высевальным аппаратом.

Поскольку для создания высевального аппарата с герметичным влагоотталкивающим загрузочным бункером необходима специальная его обработка, дальнейшие экспериментальные исследова-

ния проводились по различным поверхностям – резине, слою антигравия KUDO® (гравитекса), пластмассе, стали оцинкованной крашеной.

При трехкратном повторе движения гранул по каждой поверхности с тремя разными углами наклона удалось определить средний коэффициент трения скольжения ($\bar{f}_o$) влагоудерживающего агрохимиката для каждой экспериментальной

поверхности.

Результаты измерений и вычислений динамического коэффициента трения

скольжения ВУА по различным поверхностям представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты исследования по определению динамического коэффициента трения скольжения ВУА по различным поверхностям

№ п/п	Трущиеся пары	Угол наклона плоскости		Время движения t , с				Путь движения тела S , м	Скорость движения V , м/с	f_0	$\overline{f_0}$
				1	2	3	ср. знач				
1	Гравитекс	$\beta_1 =$	37	0,50	0,47	0,52	0,50	0,25	0,50	0,495	0,402
		$\beta_2 =$	39	0,40	0,42	0,37	0,40	0,25	0,63	0,393	
		$\beta_3 =$	41	0,35	0,37	0,33	0,35	0,25	0,71	0,318	
2	Резина	$\beta_1 =$	37	0,55	0,53	0,57	0,55	0,25	0,45	0,543	0,430
		$\beta_2 =$	39	0,36	0,39	0,32	0,36	0,25	0,70	0,294	
		$\beta_3 =$	41	0,41	0,43	0,37	0,40	0,25	0,62	0,454	
3	Сталь оцинкованная окрашенная	$\beta_1 =$	37	0,4	0,36	0,43	0,40	0,25	0,63	0,348	0,170
		$\beta_2 =$	39	0,31	0,27	0,33	0,30	0,25	0,82	0,097	
		$\beta_3 =$	41	0,28	0,26	0,27	0,29	0,25	0,86	0,066	
4	Пласт-масса	$\beta_1 =$	37	0,38	0,34	0,39	0,37	0,25	0,68	0,287	0,202
		$\beta_2 =$	39	0,34	0,36	0,33	0,34	0,25	0,73	0,253	
		$\beta_3 =$	41	0,3	0,32	0,31	0,29	0,25	0,86	0,066	

Исходя из полученных результатов проведенного эксперимента [14], был определен динамический коэффициент тре-

ния скольжения (f_0) влагоудерживающего агрохимиката по различному покрытию поверхности (рисунок 5).

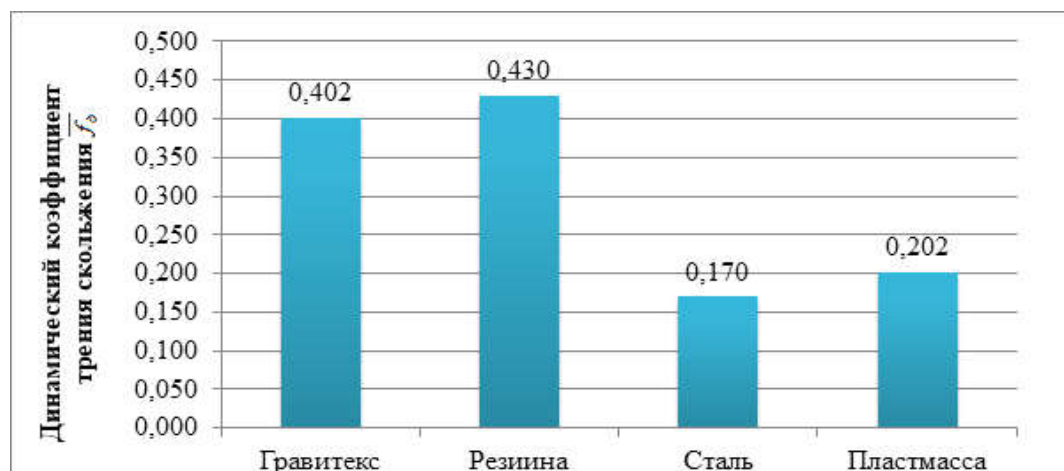


Рисунок 5. Зависимость динамического коэффициента трения скольжения влагоудерживающего агрохимиката от материала поверхности

Наиболее оптимальным покрытием рабочей поверхности бункера для ВУА определен гравитекс, который был использован в экспериментальном высевальном аппарате [15].

Выводы. 1. Анализ полученных данных по результатам натурального эксперимента, направленного на изучение физико-механических свойств влагоудерживающего агрохимиката (гидрогеля), по-

зволил установить, что с увеличением абсолютной влажности влагоудерживающего агрохимиката увеличивается его адгезия, изменяя при этом такие свойства материала, как коэффициент и угол внутреннего трения.

2. Установлено значение среднего динамического коэффициента трения скольжения ВУА для разных поверхностей. Для резины значение динамического коэффициента трения скольжения соста-

вило 0,430; для слоя антигравия KUDO®(гравитекса) – 0,402; для пластмассы – 0,202; для поверхности из стали оцинкованной крашеной – 0,170.

3. Полученные теоретико-экспериментальные результаты исследований могут быть применены как обоснование при выборе материала рабочей поверхности бункера и расчета вариантов предполагаемых конструкций высевяющих аппаратов при использовании ВУА.

Список источников

1. Tariq Z., Iqbal D.N., Rizwan M., Ahmad M., Faheem M., Ahmed M. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding // RSC Adv. 2023. 13. P. 24731-24754. doi: 10.1039/D3RA03472K
2. Лукин А.Л., Подлесных Н.В., Некрасова Т.П. Влияние влагоудерживающего сорбента на показатель густоты стояния растений озимой пшеницы // Управление инновационным развитием аграрного сервиса России: материалы национальной научно-практической конференции (15 сентября 2020 г.). Воронеж. 2020. С. 227-232. EDN: RQHJTY
3. Применение новых экологически безопасных композиционных смесей для повышения урожайности озимой пшеницы в ЦЧР / Н.В. Подлесных [и др.] // Агроэкологический вестник. Выпуск 9: мат-лы межд. научно-практ. конф. «Экологические проблемы сельскохозяйственного производства» (22 декабря 2020 г). Воронеж. 2020. С. 75-79. EDN: YCUSUC
4. Tomadoni B., Casalongué C., Alvarez V.A. Biopolymer-Based Hydrogels for Agriculture Applications: Swelling Behavior and Slow Release of Agrochemicals // Polymers for Agri-Food Applications. 02 August 2019. Pp. 99 – 125. doi:10.1007/978-3-030-19416-1_7
5. Water retention polymers to cope with drought driven by climate change for a sustainable viticulture / Abdullahi A. [et al.] // International Journal of Agricultural and Natural Sciences. 2024. Т. 17. №. 2. P. 228-240. doi:10.5281/zenodo.11408472
6. Цепляев А.Н., Тимошенко В.В., Богданов С.И. Влияние конструктивных параметров посевной комбинированной сеялки на скорость семян и гидрогеля при их подаче в рядок // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2016. №2(42). С. 241-248. EDN: WIMHFP
7. Nosevich M. Increasing yield of oil flax by improving technological process of sowing seeds together with hydrogel granules // Engineering for rural development. Jelgava. 2020. P. 826-832. doi:10.22616/ERDev.2020.19.TF193
8. Секция сеялки с устройством подачи гидрогеля: пат. RU2789007C1 / Цепляев В.А. [и др.]; заявл. 29.03.2022; опубл. 26.01.2023. EDN: QSJNCN
9. Способ определения коэффициентов трения: пат. RU2754204C1 / Иванов А.А., Гостев В.Н., Коршунов М.Д.; заявл. 25.01.2021; опубл. 30.08.2021. URL: <https://patents.google.com/patent/RU2754204C1/ru>
10. Брюховецкий А.Н., Рыжий С.В. Исследование физико-механических свойств функциональных влагоудерживающих смесей // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2022. № 2 (15). С. 332-341. EDN: MJGFKW
11. Molinari A., Estrin Y., Mercier S. Dependence of the Coefficient of Friction on the Sliding Conditions in the High Velocity Range // ASME. Journal of Tribology. January 1999. 121(1). Pp. 35–41. doi: 10.1115/1.2833808
12. Ostermeyer G.P. On the dynamics of the friction coefficient // Wear. V. 254. Issue 9. 2003. Pp. 852-858. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00235-7.
13. Методика и результаты определения коэффициента трения семенного материала с использованием автоматизированного устройства / И.А. Маркво [и др.] // Научный журнал КубГАУ. 2019. № 147 (03). doi: 10.21515/1990-4665-147-002. EDN: BKHDXF
14. Рыжий С.В. Физико-механические свойства влагоудерживающих агрохимикатов // Интеграция образования, науки и практики в АПК: проблемы и перспективы: материалы III международной научно-практической конференции. Луганск. 2023. С. 310-311. EDN: DYSWYA
15. Высевящий аппарат пневматической сеялки: пат. RU 208808 U1 / Лукин А.Л. [и др.]; заявл. 16.06.20021; опубл. 14.01.2022. EDN: XUMCSJ

References

1. Tariq Z., Iqbal D.N., Rizwan M., Ahmad M., Faheem M., Ahmed M. Significance of biopolymer-based hydrogels and their applications in agriculture: a review in perspective of synthesis and their degree of swelling for water holding. *RSC Adv.* 2023; 13: 24731-24754. doi: 10.1039/D3RA03472K
2. Lukin A.L., Podlesnykh N.V., Nekrasova T.P. Effect of water-retaining sorbent on density of winter wheat plants. *Upravlenie innovacionnym razvitiem agrarnogo servisa Rossii: materialy' nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii. Voronezh, 15 sentyabrya 2020.* 2020:227-232 (In Russ.)
3. Podlesnih N.V. [et al.]. Application of new environmentally friendly mixtures to improve winter wheat yields in the CBSR. *Agroekologicheskij vestnik. Vypusk 9: mat-ly mezhd. nauchno-prakt. konf. «Ekologicheskie problemy' sel'skohozyajstvennogo proizvodstva».* Voronezh, 22 dekabrya 2020. 2020:75-79 (In Russ.)
4. Tomadoni B., Casalengué C., Alvarez V.A. Biopolymer-Based Hydrogels for Agriculture Applications: Swelling Behavior and Slow Release of Agrochemicals. *Polymers for Agri-Food Applications.* 02 August 2019: 99-125. doi:10.1007/978-3-030-19416-1_7
5. Abdullahi A. [et al.]. Water retention polymers to cope with drought driven by climate change for a sustainable viticulture. *International Journal of Agricultural and Natural Sciences.* 2024;17(2):228-240. doi:10.5281/zenodo.11408472
6. Tseplyaev A.N., Timoshenko V.V., Bogdanov S.I. Influence of design parameters of seeding drills speed and seeds hydrogels when submitting them to the row. *Proceedings of Lower Volga agro-university complex: science and higher education.* 2016;2(42):241-248 (In Russ.).
7. Nosevich M. Increasing yield of oil flax by improving technological process of sowing seeds together with hydrogel granules. *Engineering for rural development. Jelgava.* 2020:826-832. doi:10.22616/ERDev.2020.19.TF193
8. Patent RU2789007S1. Seeder section with hydrogel feeder. Tseplyaev V.A. [et al.]; zayavl. 29.03.2022; opubl. 26.01.2023 (In Russ.).
9. Patent RU2754204C1. Method for determining coefficients of friction. Ivanov A.A., Gostev V.N., Korshunov M.D.; zayavl. 25.01.2021; opubl. 30.08.2021. (In Russ.)
10. Briukhovetskii A.N., Ryzhyi S.V. Study of the physico-mechanical properties of water retaining functional composition. *Scientific Bulletin of the Luhansk State Agrarian University.* 2022;2(15):332-341 (In Russ.).
11. Molinari A., Estrin Y., Mercier S. Dependence of the Coefficient of Friction on the Sliding Conditions in the High Velocity Range. *ASME. Journal of Tribology.* 1999;121(1):35-41. doi: 10.1115/1.2833808
12. Ostermeyer G.P. On the dynamics of the friction coefficient. *Wear.* 2003; 254(9):852-858. doi: 10.1016/S0043-1648(03)00235-7.
13. Methods and results of the seed material friction coefficient determining using an automated device / I.A. Markvo [et al.]. *Scientific Journal of KubSAU.* 2019;147(03) (In Russ.). doi: 10.21515/1990-4665-147-002
14. Ryzhiy S.V. Physico-mechanical properties of moisture-retaining agrochemicals. *Integraciya obrazovaniya, nauki i praktiki v APK: problemy' i perspektivy: materialy' III mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Lugansk.* 2023:310-311 (In Russ.).
15. Pneumatic seed drill: pat. RU 208808 U1 / Lukin A.L. [et al.]; zayavl. 16.06.20021; opubl. 14.01.2022. (In Russ.).

Сведения об авторах

Сергей Владимирович Рыжий – старший преподаватель кафедры тракторов и автомобилей, Луганский государственный аграрный университет им. К. Е. Ворошилова, ryzhyy1983@mail.ru

Information about the authors

Sergey V. Ryzhiy – Senior Lecturer, Chair of Tractors and Automobiles, Lugansk State Agrarian University, ryzhyy1983@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.05.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 08.07.2025.

The article was submitted 13.05.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 08.07.2025.