



Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью

Н. Н. Барышева^{1*}, С. П. Пронин¹, Д. Д. Барышев¹,
В. И. Беляев²

¹ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова»
(г. Барнаул, Российская Федерация)

²ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» (г. Барнаул, Российская Федерация)

*mnp-t@mail.ru

Введение. Урожайность яровой пшеницы в значительной мере зависит от сорта, качества посевного материала, технологии возделывания и агроклиматических факторов. Установлено, что разделение семян пшеницы на фракции позволяет повысить уровень послеуборочной обработки, скорректировать качество зерна в зависимости от целевого назначения, а посев – увеличить урожайность. Целью статьи является исследование мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, сопоставление определенных признаков мембранного потенциала с аэродинамическими свойствами этих зерен и с урожайностью выбранных сортов.

Материалы и методы. Семена, разделенные на фракции, отличаются разными посевными качествами. Биологически неполноценные семена дают плохую всхожесть. Проведенный обзор свидетельствует о том, что разделение семян на фракции дает положительные тенденции в повышении урожайности, однако основными показателями качества остаются всхожесть и энергия прорастания, поэтому был разработан подход, который позволит определить качество семян пшеницы, разделенных на фракции.

Результаты исследования. Проведено исследование изменения мембранного потенциала семян пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам. Представлены результаты апробации схемы включения зерна пшеницы в электрическую цепь с плоскими поверхностями электрода-зажима. Для исследования влияния сорта пшеницы, аэродинамических свойств зерен и урожайности на изменения мембранного потенциала были проанализированы следующие признаки: уровень потенциала покоя; 10-процентное время нарастания переменного потенциала; максимальное значение переменного потенциала.

Обсуждение и заключение. В результате двухфакторного дисперсионного анализа результатов исследования определены новые информативные показатели, которые достоверно отражают аэродинамические свойства семян и могут быть использованы для прогнозирования урожайности. Использование полученных результатов позволит сельскохозяйственным предприятиям, фермерским хозяйствам определить качество послеуборочной обработки семян пшеницы, скорректировать качество в зависимости от целевого назначения, выполнить оценку и прогноз урожайных свойств со стороны семенного материала.

© Барышева Н. Н., Пронин С. П., Барышев Д. Д., Беляев В. И., 2020



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

Ключевые слова: зерна пшеницы, урожайность, мембранный потенциал, варибельный потенциал, показатели, аэродинамические свойства, фракции

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Сравнение мембранного потенциала зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, разных сортов с разной урожайностью / Н. Н. Барышева, С. П. Пронин, Д. Д. Барышев, В. И. Беляев. – DOI [10.15507/2658-4123.030.202004.550-575](https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575) // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 4. – С. 550–575.

Original article

Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their Aerodynamic Properties

N. N. Barysheva^{a*}, S. P. Pronin^a, D. D. Baryshev^a,
V. I. Belyaev^b

^aPolzunov Altai State Technical University
(Barnaul, Russian Federation)

^bAltai State Agricultural University (Barnaul, Russian Federation)

*mnn-t@mail.ru

Introduction. Spring wheat yield depends largely on the wheat variety, seed quality, cultivation technology, and agro-climatic factors. It has been found that the separation of wheat seeds into fractions makes it possible to improve the quality of post-harvest processing, adjust the quality of grain depending on the intended use, and the sowing of the wheat grains divided into fractions allows increasing productivity. The aim of the article is to explore the membrane potential on the shells of wheat grains divided into fractions according to their aerodynamic properties and to compare certain membrane potential features with aerodynamic properties of these grains and the yields of selected varieties.

Materials and Methods. The seeds, divided into fractions, have different sowing qualities. Biologically deficient seeds have poor germination index. The study have found that the division of seeds into fractions contributes to increasing yields, but the main indicators of quality are still germination and viability, for this reason an approach has been developed to determine the quality of wheat seeds divided into fractions.

Results. This article studies the change in membrane potential of wheat seeds, divided into fractions according to their aerodynamic properties. The article presents the results of testing a new clamping electrode with a smooth surface to measure the membrane potential of wheat gains. To study the effect of the wheat variety, the aerodynamic properties of grains and yield on changes in membrane potential, we analyzed three indices: the resting potential level, time of variable potential rise to the maximum value and variable potential maximum value.

Discussion and Conclusion. New informative indicators have been determined because of the two-way analysis of variance of the research results. These indicators reliably reflect the aerodynamic properties of seeds and can be used to predict yields. The use of the obtained results will allow agricultural enterprises and farms to determine the quality of post-harvest processing of wheat seeds, adjust the quality depending on the intended use, and evaluate and forecast the productivity of seeds.

Keywords: wheat grains, yield, membrane potential, variable potential, indicators, aerodynamic properties, fractions

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

For citation: Barysheva N.N., Pronin S.P., Baryshev D.D., et al. Comparing the Membrane Potential of Wheat Grains of Different Varieties and Productivity Divided into Fractions According to Their Aerodynamic Properties. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(4):550-575. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202004.550-575>

Введение

Важным фактором полной реализации урожайного потенциала возделываемых сортов сельскохозяйственных культур является обеспечение высокого качества семян. Их производство является основной проблемой развития сельскохозяйственной отрасли.

Качество семян определяется тремя основными составляющими: посевные, сортовые качества и урожайные свойства [1].

Показатели посевных качеств представляют собой совокупность физических свойств семян, характеризующих степень их пригодности для посева. Основные из них – лабораторная всхожесть, энергия прорастания, чистота семенного материала – стандартизированы¹.

Исследования зависимости значений мембранного потенциала семян пшеницы от их лабораторной всхожести показали, что результаты могут быть использованы для оценки посевных качеств. Разработанный метод дает возможность использовать значение мембранного потенциала семян пшеницы в качестве показателя их посевного качества [2].

К сортовым качествам семян пшеницы относятся подлинность и сортовая чистота семян, показатели определяются после полевой апробации [1].

Урожайные свойства зависят не только от агроклиматических условий и приемов возделывания, но и определяются морфологическими и физиологическими особенностями семян [3].

В связи с необходимостью повышения урожайности возделываемых сортов сельскохозяйственных культур изучение урожайных свойств семян и их зависимость от посевных качеств является актуальным вопросом на сегодняшний день.

Однако важно учитывать, что посевное качество зависит не только от

условий выращивания, способов уборки, сушки, но и от послеуборочной обработки [4–8].

Зерновая масса неоднородна по целому ряду признаков. Семена пшеницы, разделенные на фракции, различаются по биохимическому составу и технологическим качествам [8; 9].

Щуплые, недозрелые, легковесные и поврежденные семена являются биологически неполноценными и дают плохие показатели качества [11]. Полновесные семена характеризуются большей жизнеспособностью.

Выделение из общей массы семян пшеницы по определенным критериям качества позволит повысить урожайность за счет более дружных всходов, сократить норму высева, скорректировать качество зерен в зависимости от целевого назначения [11; 12].

Целью данной работы является исследование и сравнение мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, сопоставление определенных признаков мембранного потенциала с аэродинамическими свойствами этих зерен и с урожайностью выбранных сортов.

Обзор литературы

Урожайные свойства семян пшеницы зависят от климатических условий, плодородия почвы, агротехнических приемов. Однако основополагающую роль в формировании урожая играет посевное качество семян пшеницы.

Проблема оценки показателей посевного качества семян пшеницы достаточно широко изучена, представлено множество методов и средств диагностики [13; 14]. Проведено исследование взаимосвязи биологических свойств семян в зависимости от почвенно-климатических условий. Авторами представлена модель прогнозирования урожайных свойств семян [15].

¹ Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods. Zurich: ISTA, 1995. 117 p. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/19960707176> (дата обращения: 15.10.2020).

На примере ряда видов растений установлено, что одним из объективных параметров оценки качества семян являются их форма, размер и плотность. Каждому сорту или гибриду свойственна оптимальная форма семян, при которой посевной материал обладает наиболее высокими биологическими свойствами, которые определяются анатомическими и морфологическими особенностями их структуры, биохимическим составом и физиологическим состоянием [15].

Разделение семян по форме, размеру и плотности происходит в процессе обработки после сбора урожая. По основным физическим различиям происходит отделение семян от сорняков, поврежденных, щуплых семян [16].

Для обработки семян используются такие машины, как спиральные сепараторы и гравитационные столы, которые выполняют точное разделение по определенной физической характеристике [12; 16].

Разделение семян на фракции возможно при использовании воздушно-решетчатых зерноочистительных машин, настроенных на режим фракционирования, по двум признакам: размер зерна и аэродинамические свойствам [12; 16].

По принципу действия сепараторы можно разделить на механические, пневматические, электрические, оптические и рентгеновские [6; 17].

Ранние исследования показали, что использование гравитационного стола было эффективно для разделения семян на фракции по размеру. Фракции с семенами большого размера (более тяжелыми, крупными) давали более эффективные результаты в тестах на всхожесть, чем фракции с небольшими семенами [16].

Исследования размера и веса семян пшеницы показали, что у пшеницы размер семян коррелировал с урожайностью, тогда как масса семян не имела аналогичной тенденции [16]. Более крупные и тяжелые семена име-

ли меньшее содержание влаги, чем более мелкие и более легкие семена, что считалось экономически выгодным, поскольку затраты на сушку уменьшались [16].

Аэродинамические свойства семян – это совокупность свойств, определяющих способность частиц перемещаться под воздействием воздушного потока. Чем большее сопротивление воздуха испытывает зерно, тем медленнее движется и тем раньше упадет.

Сепарация в аэродинамическом потоке позволяет разделять семенной материал на фракции по удельному весу. Данный способ сепарации обеспечивает однородность семян при сепарации $\pm 3\%$, что дает возможность выделять фракции с повышенным содержанием клейковины и белка [6; 19].

В процессе сепарирования скорость воздушного потока регулируют по выносу полноценных семян в отходы. При обработке пшеницы скорость воздушного потока в пневмосепарирующих каналах обычно колеблется в пределах от 6 до 11 м/с.

К примеру, для семян озимой пшеницы рекомендуемая скорость потока воздуха в очистительных машинах составляет не менее 8 м/с. Установлено, что использование скорости потока воздуха не менее 8 м/с положительно сказывается на посевном качестве семян пшеницы [20].

Разделение семян по аэродинамическим признакам позволяет выявить семена, подверженные прорастанию, до сбора урожая пшеницы. Метод основан на взаимодействии силы трения и подъемной силы давления воздуха для разделения пшеницы на фракции. Очистка с аспирацией воздухом не использует трение как фактор разделения образца (в данном случае используется только давление воздуха) [17; 18].

Семена, разделенные на фракции, отличаются разными посевными качествами: легкие, щуплые семена – биологически неполноценные, дают

плохие показатели качества; крупные семена с большим удельным весом характеризуются большей жизнеспособностью [12].

В технологических процессах сепарации зерна разделение посевного материала на фракции следует считать одним из агрономических приемов повышения урожайности зерновых культур. Система мер сепарации позволяет обеспечить высокие урожайные свойства зерна, но необходимо также учитывать, что посевные качества семян являются важным фактором, определяющим урожайность. Только при высоких показателях посевного качества могут быть реализованы все потенциальные возможности сорта [19].

Материалы и методы

Для проведения экспериментальных исследований были выбраны семена производственных посевов следующих сортов яровой пшеницы из урожая 2019 г.:

1) «Алтайская 75» (АО «Чистюньское», Топчихинский р-н, Алтайский край, $S = 228$ га);

2) «Гранни» (ООО «Вирт», Целинный р-н, Алтайский край, $S = 154$ га);

3) «Алтайская 75» (АО «Чистюньское», Топчихинский р-н, Алтайский край, $S = 77$ га);

4) «Тасос» (ООО «Рассия», Новичинский р-н, Алтайский край, $S = 95$ га).

Урожайность семян сорта «Алтайская 75 (228)» составила в 2019 г. 16,4 ц/га, сорта «Гранни» – 22,3 ц/га, сорта «Алтайская 75 (77)» – 35,0 ц/га, урожайность сорта «Тасос» – 39,6 ц/га. Нормы высева семян – 4 млн шт/га.

Разделение семян на фракции по аэродинамическим свойствам

Отбор проб для исследования проводился в соответствии с ГОСТом 12036-85².

Разделение зерен пшеницы по аэродинамическим свойствам выполнено с помощью лабораторного парусного классификатора К-93. Скорости воздушных потоков составляли от 8 до 11 м/с с шагом в 1 м/с.

Таким образом, для исследований было получено 16 образцов зерен (по 4 образца с разными аэродинамическими свойствами для каждого сорта).

Каждый образец содержал 1 100 зерен (1 000 для определения массы тысячи зерен, 100 для измерения мембранного потенциала).

Оценка показателей качества

Перед экспериментальным исследованием мембранного потенциала была измерена масса тысячи зерен каждого образца и проведена оценка лабораторной всхожести по методам ISTA. Из каждого образца зерен, отобранного по аэродинамическим свойствам, были взяты зерна для прорастания на фильтровальной бумаге. Лабораторная всхожесть установлена в соответствии с правилами Международной ассоциации по контролю качества семян (ISTA)³. Через семь дней проращивания семян при температуре 20 ± 1 °С были проведены подсчеты нормально проросших зерновок. К числу нормально проросших относят зерна, имеющие хорошо развитые корешки и первичные листочки, занимающие не менее половины длины колеоптиля⁴. В соответствии с количеством проросших зерен установлен процент всхожести. Данные представлены в таблице. Как видно из таблицы, зерна имеют низкую лабораторную всхожесть. Причиной является тот факт, что измерения выполнены сразу после уборки урожая, поэтому зерна не прошли послеуборочного дозревания [26]. У всех куль-

² ГОСТ 12036-85. Семена сельскохозяйственных культур. Правила приемки и методы отбора проб (с Изменениями № 1, 2).

³ Hampton J. G., TeKrony D. M. Handbook of Vigour Test Methods.

⁴ Там же.

тур независимо от режима созревания семян с увеличением периода покоя лабораторная всхожесть, как правило, повышается [26]. Тем не менее данные по лабораторной всхожести оказались полезными при исследовании потенциала покоя у зерен пшеницы.

Измерительный процесс

Для исследования электрофизических свойств семян пшеницы выбран метод, основанный на теории мембранного потенциала [2]. Методика исследования мембранного потенциала семян пшеницы позволяет в кратчайшие сроки определить качество семенного материала и заключается в подготовке семян в течение 12 часов в термокамере при температуре 20 °С с использованием дистиллированной воды и дальнейшем измерении мембранного потенциала с помощью платы сбора данных ЛА-50 USB [2]. Система измерения мембранного потенциала подробно представлена в одной из работ [2].

Визуальный анализ на наличие поврежденных, щуплых, пустотелых семян в данном случае не проводился, поскольку семена прошли предварительный отбор по аэродинамическим свойствам.

Для проведения измерений был модифицирован электрод-держатель. В предыдущих исследованиях применялся электрод-держатель, выполненный в виде «крокодила» с острыми зубцами [2]. Зубчатый электрод был заменен на гладкий, который обеспечивает плотный контакт с оболочкой зерна. Система для измерения мембранного

потенциала у зерен пшеницы представлена на рисунке 1.

Для измерения напряжения использовалось однополюсное подключение зерна к плате ЛА-50 USB. Измеряемый сигнал подавался на нулевой вход, остальные 15 входов заземлены.

Для уменьшения уровня шума к измерительным электродам подключен резистор номиналом $R = 100$ кОм.

Запись сигнала осуществлялась с помощью программного обеспечения Saver. С помощью программного интерфейса пользователя были установлены частота дискретизации 300 Гц и время одного измерения 5 с.

Обработка данных

Детальное изучение полученных сигналов показало, что на регистрируемый мембранный потенциал накладывается гармоническая помеха с периодом 6 отсчетов. Учитывая, что один отсчет равен 1/300 с, получим частоту помехи, равную 50 Гц. Для ее исключения в регистрируемых данных использовался метод скользящего среднего окном в 48 отсчетов.

Для проверки однородности выборки полученных сигналов использовался тест Чоу.

При вычислении средних значений параметров, приведенных в таблице, грубые измерения исключались по критерию Граббса. Для анализа влияния сорта и аэродинамических свойств зерен пшеницы на изменения мембранного потенциала применялся двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями.



Р и с. 1. Система для измерения мембранного потенциала у зерен пшеницы

F i g. 1. System for measuring membrane potential in wheat grains

Результаты исследования

Для проведения исследований было отобрано 4 сорта семян пшеницы. В таблице приведена информация о сортах пшеницы и их урожайности. Зерна каждого сорта были разделены по аэродинамическим свойствам (АДС) на четыре группы, представлено соотношение распределения зерен пшеницы по АДС (табл.).

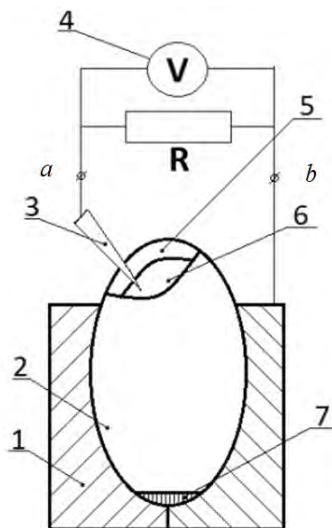
«Гранни» и «Тасос» являются немецкими сортами, «Алтайская 75» – это российский сорт мягкой яровой пшеницы. Для исследований взяты две пробы сорта «Алтайская 75» разной урожайности. Урожайи получены с двух разных полей.

Для алтайского сорта зерен пшеницы процент фракции семян, отобранных при скорости 9 м/с, в общем объеме выше, чем для остальных образцов. Для немецких сортов наибольшая доля семян в общем объеме была получена для фракции при скорости 8 м/с.

По каждой скорости сепарирования приведена масса 1 000 зерен (табл.). Для сорта «Гранни» получен аномальный результат. При скорости сепарирования 9 м/с масса меньше, чем при 8 м/с. У всех остальных сортов наблюдается закономерное возрастание массы 1 000 зерен с увеличением скорости сепарирования.

По каждому из 16 отобранных образцов зерен пшеницы были проведены исследования изменений мембранного потенциала. На рисунке 2 показана функциональная схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь.

На этапе подготовки зерна к измерению происходит его набухание. В процессе набухания зерна под действием дистиллированной воды ионы на внешней стороне оболочки накапливаются за счет ионов, расположенных на внутренней ее стороне [21]. Возникает мембранный потенциал (МП), который



Р и с. 2. Функциональная схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь: 1 – электрод-зажим; 2 – зерно пшеницы; 3 – электрод-игла; 4 – вольтметр; 5 – оболочка зерна; 6 – область зародыша зерна; 7 – хохолок зерна

F i g. 2. Functional diagram of the inclusion of wheat grain in the electrical circuit: 1 – electrode clamp; 2 – wheat grain; 3 – electrode needle; 4 – voltmeter; 5 – grain shell; 6 – area of a grain germ; 7 – tuft of grain

можно зафиксировать на зажимах электродов $a - b$ (рис. 2).

Предположим, что концентрации ионов и проницаемости оболочек зерен пшеницы отличаются не только у семян разных сортов, но и у семян с различными АДС. Следовательно, изменения МП во времени тоже должны быть разными. Исследования изменений МП семян разных фракций позволят определить информативные признаки, которые будут достоверно отражать АДС.

На рисунке 3 представлены типичные графики изменения МП для сортов «Гранни» и «Тасос» из фракции семян, отсортированных при скоростях 8 и 9 м/с. Аналогичные экспериментальные графики были получены для других сортов с различными АДС.

Результаты исследований показали, что выборки наблюдений состоят из нескольких подвыборок. На рисунке 3а сигналы № 1 и 2 имеют явные визуальные отличия от остальных. С целью установить, необходимо ли оценивать одну объединенную регрессию или отдельные регрессии для каждой подвыборки, было проведено статистическое исследование. С помощью теста Чоу была выполнена проверка однородности выборки и подтверждено выявленное различие. Так как фактическое значение F -критерия больше табличного, следует признать существенность различия исследуемых подвыборок. Основываясь на полученных результатах статистического анализа, принято решение исключить сигналы № 1 и 2 из дальнейшей обработки. Аналогичным образом, были проанализированы результаты исследований для всех 16 образцов зерен пшеницы. Практически из каждой выборки были исключены от одного до трех сигналов.

Экспериментально установлено, что в момент прокалывания оболочки зерна электродом-иглой наблюдается отрицательный мембранный потенциал (до 1 с), который называют потенциалом покоя. На рисунке 4 он обозначен

временным интервалом t_{pr} . Потенциал покоя выделен как первый возможный признак мембранного потенциала, характеризующий свойства зерна.

После потенциала покоя на графиках наблюдается фаза деполяризации оболочки зерна с резким скачком мембранного потенциала до максимального значения и длительной нерегулярной ветвью.

Согласно классификации сигналов высших растений подобные сигналы называют переменным потенциалом (ВП) [22–24].

На временном интервале деполяризации t_d визуально были выделены еще три признака, которые могут отражать совпадения и различия между сортами пшеницы, их аэродинамическими свойствами и урожайностью. Первый – это линейная скорость нарастания ВП на временном интервале t_l . Второй – это 10-процентное время нарастания ВП от значения $0,9 \cdot \max VP$ до $\max VP$ на временном интервале t_{10} , где $\max VP$ – максимальное значение ВП. Третий – максимальное значение ВП. Все интервалы приведены на рисунке 4.

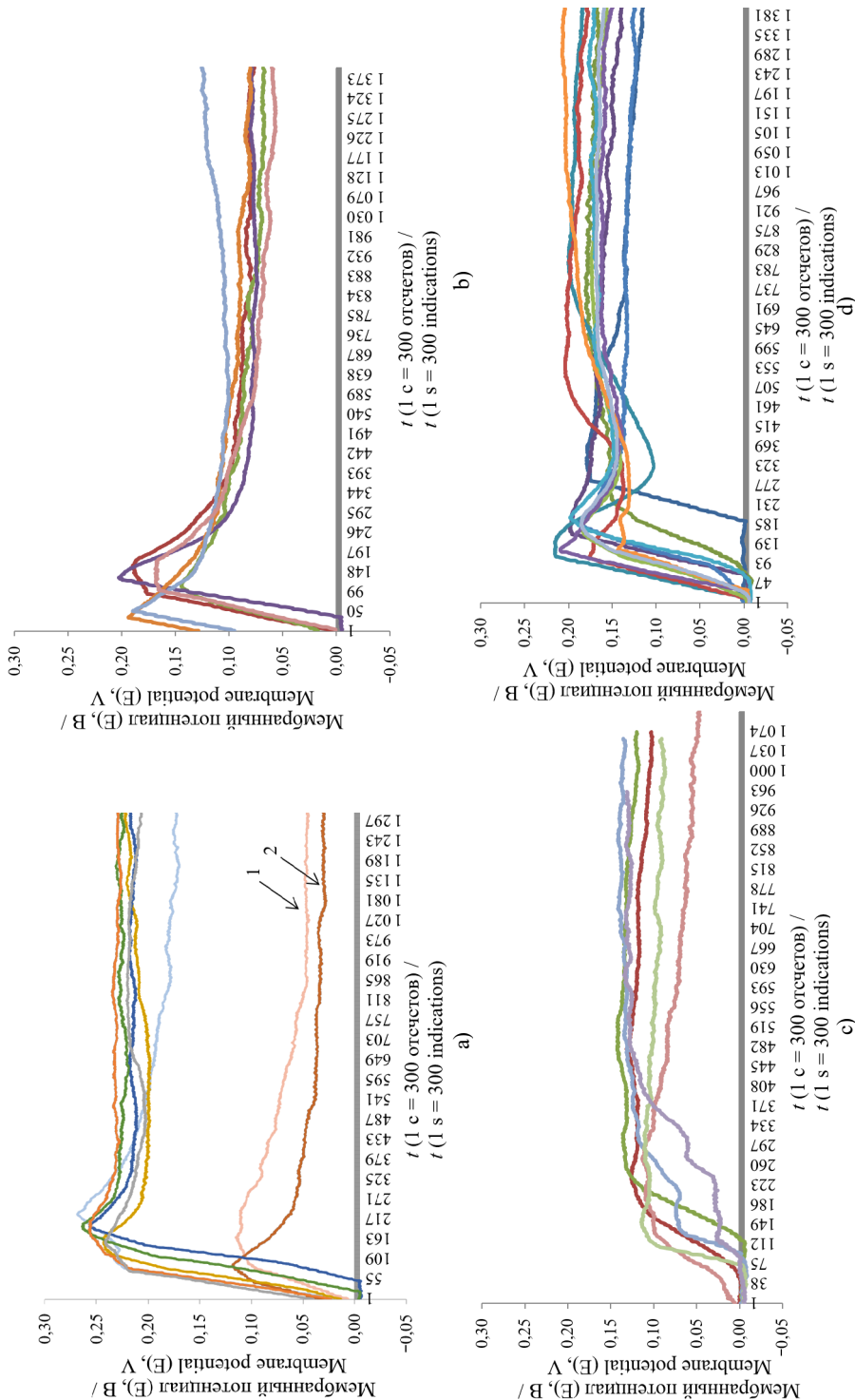
Потенциал покоя как первый информативный признак

Следуя классической теории мембранного потенциала, при набухании зерна ионы K^+ выходят на наружную сторону оболочки, поэтому на внутренней стороне возникает отрицательное значение за счет ионов Cl^- , что и подтверждают экспериментальные графики. На зажимах $a - b$ возникает потенциал покоя с отрицательным значением на зажиме a . Оценим возможность применения потенциала покоя как признака, характеризующего такие свойства, как сорт, АДС, урожайность.

Согласно теории Ходжкина – Хакси, сила калиевого I_K и натриевого I_{Na} токов равны соответственно [25]:

$$I_K = g_K (V - V_K), \quad (1)$$

$$I_{Na} = g_{Na} (V - V_{Na}), \quad (2)$$



Р и с. 3. Экспериментальные графики изменения мембранного потенциала во времени:

а, б – графики зерен пшеницы сорта «Гранини» при скоростях сепарирования 9 и 10 м/с соответственно;

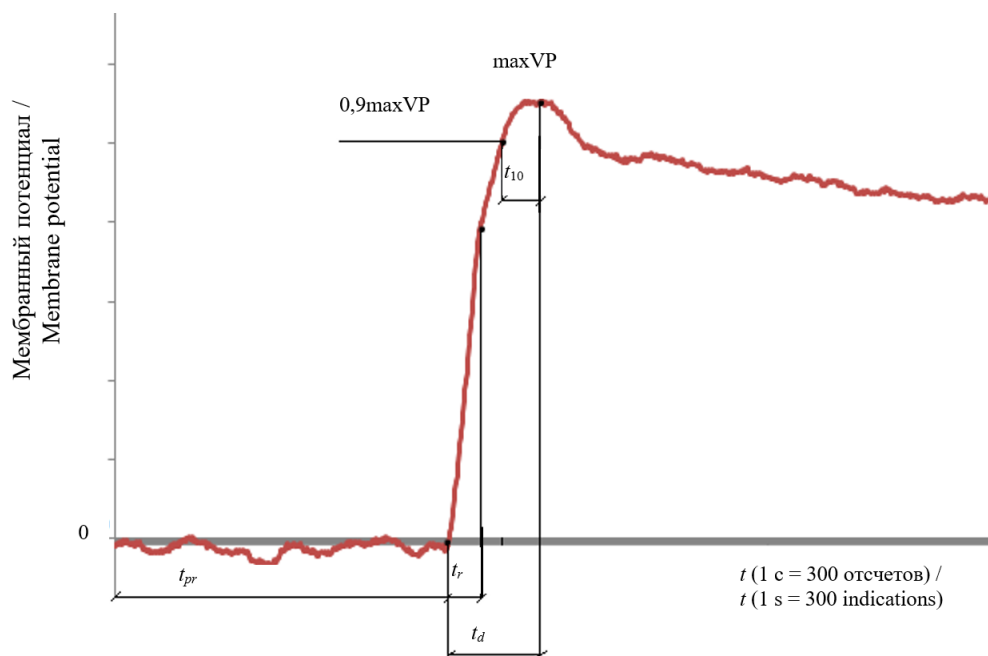
с, д – графики зерен пшеницы сорта «Тасос» при скоростях сепарирования 9 и 10 м/с соответственно

Fig. 3. Experimental graphs of membrane potential changes over time: а, б – graphs of wheat seeds of the “Granini” variety for the separation speeds 9 and 10 m/s; с, д – Tasos” variety for the separation speeds 9 and 10 m/s

Таблица
Table

Результаты исследования переменного потенциала
Results of the variable potential study

Сорт, урожайность, ц/га / Variety productivity, q/ha	Скорость сепарирования, м/с / Separation rate, m/s	Распределение семян по скорости сепарирования, % / Seeds distribution according to the speed of separation, %	Масса 1 000 зерен, г / Mass of 1,000 grains, g	Всхожесть, % / Germination, %	Скорость нарастания ВП, мВ/с / VP growth rate, mV/s	10-процентное время нарастания ВП, с / 10% rise time of VP, s	Среднее максимальное значение ВП, мВ / Average maximum value of VP, mV
1	2	3	4	5	6	7	8
«Алтайская 75 (228)» 16,4 ц/га / "Altayskaya 75 (228)", 16,4 q/ha	8	10,8	21,15	42 %	1,03	0,02 ± 0,01	249 ± 6
	9	40,8	30,69	62 %	0,52	0,15 ± 0,01	174 ± 4
	10	40,4	35,21	50 %	1,14	0,04 ± 0,01	221 ± 7
«Гранни» 22 ц/га / "Granni" 22 q/ha	11	8,0	39,89	35 %	0,75	0,03 ± 0,01	207 ± 6
	8	45,0	38,30	50 %	0,57	0,13 ± 0,01	258 ± 3
	9	34,5	29,30	90 %	0,49	0,31 ± 0,02	236 ± 6
«Алтайская 75 (77)» 35 ц/га / "Altayskaya 75 (77)" 35 q/ha	10	13,2	40,10	58 %	0,46	0,10 ± 0,01	176 ± 4
	11	6,4	42,90	42 %	0,40	0,09 ± 0,01	126 ± 5
	8	32,0	24,26	58 %	0,72	0,19 ± 0,01	231 ± 5
«Тасос» 39,6 ц/га / "Tasos" 39,6 q/ha	9	44,4	29,54	87 %	0,50	0,45 ± 0,01	161 ± 5
	10	14,8	34,23	50 %	0,83	0,09 ± 0,01	209 ± 7
	11	8,8	37,80	75 %	0,26	0,05 ± 0,01	74 ± 2
«Тасос» 39,6 ц/га / "Tasos" 39,6 q/ha	8	44,6	28,20	50 %	0,46	0,24 ± 0,01	197 ± 3
	9	36,0	31,10	92 %	0,33	0,54 ± 0,02	137 ± 1
	10	18,0	36,50	60 %	0,61	0,22 ± 0,01	200 ± 3
	11	1,4	40,60	40 %	0,52	0,10 ± 0,01	162 ± 4



Р и с. 4. Фазы изменения мембранного потенциала: t_{pr} – временной интервал потенциала покоя; t_d – временной интервал деполяризации оболочки зерна; t_r – временной интервал линейного нарастания ВП; t_{10} – 10-процентное время нарастания ВП от значения $0,9\max VP$ до $\max VP$; $\max VP$ – максимальное значение ВП

F i g. 4. Phases of membrane potential change: t_{pr} – the time interval of the resting potential; t_d – the time interval of depolarization of the grain shell; t_r – the time interval of a linear increase in VP; t_{10} – 10% of the rise time of the VP from the value of $0.9\max VP$ to $\max VP$; $\max VP$ – maximum value of variable potential (VP)

где V – потенциал на оболочке зерна; g_K , g_{Na} – калиевая и натриевая проводимости; V_K , V_{Na} – равновесные потенциалы для ионов K^+ и Na^+ .

В нашем случае V – это потенциал покоя, отраженный графически на рисунке 4. При потенциале покоя алгебраическая сумма токов равна нулю, поэтому:

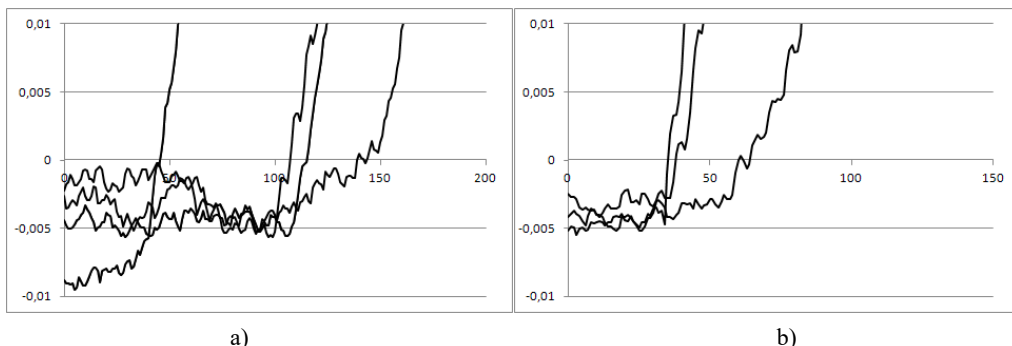
$$g_K(V - V_K) + g_{Na}(V - V_{Na}) = 0. \quad (3)$$

В одном из исследований приведены экспериментальные данные проницаемостей оболочек зерен пшеницы «Алтайский янтарь» [21]. При высокой всхожести проницаемость оболочки для ионов K^+ в 26 раз больше, чем

для ионов Na^+ . При низкой всхожести проницаемость для ионов K^+ в 260 раз выше, чем для ионов Na^+ . Поскольку проницаемость для ионов K^+ гораздо выше, чем для ионов Na^+ , то для оценки равновесного потенциала K^+ примем значения, показанные на рисунке 5.

Ионная проницаемость может быть выражена в терминах ионной проводимости, поэтому приведенные соотношения перенесем на проводимости [25].

Зерна сорта «Тасос» имеют при скорости 9 м/с высокую лабораторную всхожесть 92 % (табл.). На основе экспериментальных данных (рис. 5а) примем равновесный потенциал $V_K = -10$ мВ. Равновесный натриевый потенциал – это максимальное значение



Р и с. 5. Изменение мембранного потенциала семян пшеницы:
а) сорт «Тасос», 9 м/с; б) сорт «Гранни», 9 м/с

Fig. 5. Change in the membrane potential of wheat grains: a) variety “Tasos”, 9 m/s;
b) variety “Granni”, 9 m/s

вариабельного потенциала. По графикам на рисунке 3с можно отметить, что максимальное значение ВП лежит в диапазоне от +120 до +150 мВ. Тогда уравнение (3) для нижней границы примет вид:

$$26g_{Na}(V + 10) + g_{Na}(V - 120) = 0. \quad (4)$$

Решая данное уравнение, получим величину потенциала покоя $V = -5,2$ мВ. Для верхней границы равновесного потенциала $V_{Na} = 150$ мВ, поэтому значение потенциала покоя $V = -4,07$ мВ. Из полученных значений следует, что диапазон изменения потенциала покоя для зерен из фракции 9 м/с сорта «Тасос» составляет 1,13 мВ, а среднее значение – минус 4,6 мВ. Из графиков видно, что у зерен нет стабильного уровня потенциала покоя. Графики представляют ритмические колебания с различной частотой и амплитудой.

На рисунке 5b представлены графики потенциала покоя зерен пшеницы сорта «Гранни» с аэродинамическими свойствами 9 м/с. Зерна имеют низкую всхожесть (60 %, табл.). При низкой всхожести проводимость оболочки для ионов K^+ в 260 раз выше, чем для ионов Na^+ . По максимумам графиков на рисунке 3а можно определить диапазон

равновесного натриевого потенциала: $V_{Na} = 240 \div 260$ мВ. За равновесный калиевый потенциал примем значение $V_K = -5$ мВ (рис. 5b).

Тогда уравнение (3) при условии $V_{Na} = 240$ мВ запишется в виде:

$$260g_{Na}(V + 5) + g_{Na}(V - 240) = 0. \quad (5)$$

А при $V_{Na} = 260$ мВ:

$$260g_{Na}(V + 5) + g_{Na}(V - 260) = 0. \quad (6)$$

Решая эти уравнения, получим оценку потенциала покоя, который лежит в диапазоне от $-4,1$ до $-4,4$ мВ, а среднее значение составляет $-4,25$ мВ. Сравнивая полученный результат с экспериментальными графиками на рисунке 5b, видим, что изменение потенциала покоя лежит в очень узком диапазоне.

Статистическое усреднение по группе семян с одними и теми же АДС приводит к результату, близкому -5 мВ. Аналогичные вычисления по другим сортам привели к такому же результату.

Следовательно, уровень потенциала покоя не может быть характерным отличительным признаком между зернами различных сортов, АДС и урожайности.

Скорость нарастания сигнала как второй информативный признак

В одной из работ сделан вывод о том, что в формирование фазы деполаризации у высших растений большой вклад вносит выходящий поток ионов Cl^- в сравнении с выходящим потоком протонов [22]. Эксперименты выполнялись на проростках тыквы и зерен пшеницы. Допустим, что аналогичный механизм действует и на оболочке зерна пшеницы. Тогда за счет выхода ионов Cl^- за пределы оболочки на внутренней ее стороне образуется избыток положительных ионов. Ток идет от зажима *a* к зажиму *b* (рис. 2). Открываются каналы оболочки для ионов Na^+ . Электрическая цепь замыкается, происходит длительная «разрядка» в виде нерегулярной ветви на графиках.

Конечно, высказанный механизм движения ионов в экспериментальной установке является гипотезой, которая еще требует своего подтверждения. Однако именно гипотеза позволяет более осознанно определить признаки у исследуемых сигналов, которые можно будет сопоставить с сортом, урожайностью и аэродинамическими свойствами зерен.

Таким образом, в качестве второго информативного признака выбрана скорость нарастания ВП в фазе деполаризации на прямолинейном участке.

Аналогично выводам авторов, изложенным в другой работе, скорость нарастания ВП характеризует скорость изменения проницаемости оболочки для ионов Na^+ , а значит, выражает особенности сорта пшеницы с определенными аэродинамическими свойствами их зерен [25].

Скорость нарастания ВП вычисляли по формуле $\Delta V/\Delta t$, где ΔV – величина изменения ВП на соответствующем ему временном интервале Δt . Скорость, мВ/мс.

Для анализа влияния сорта и АДС зерен пшеницы на скорость нарастания

ВП был применен двухфакторный дисперсионный анализ с повторениями.

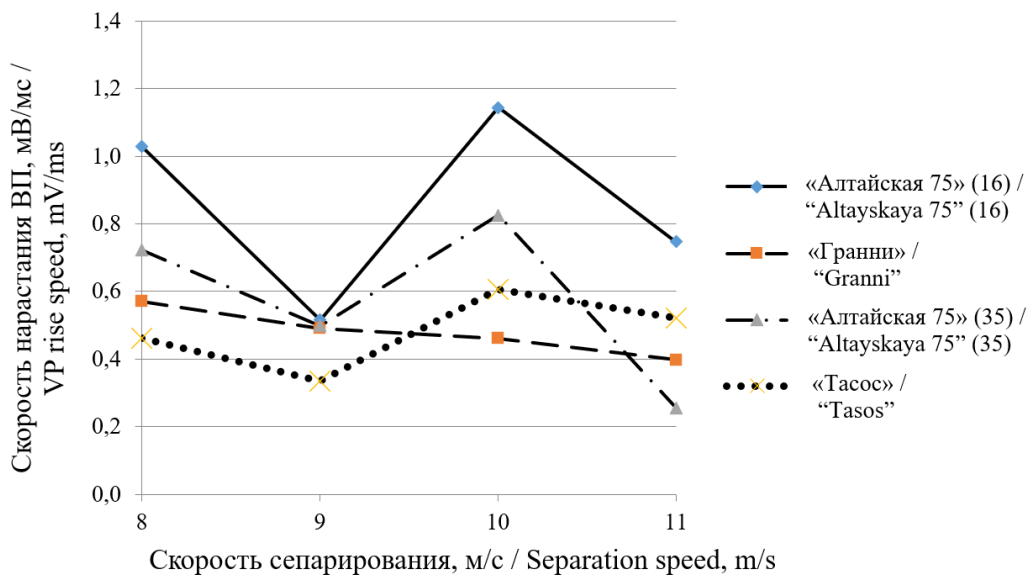
Как следует из таблицы, каждый из четырех сортов пшеницы (первый фактор) включает в себя по четыре фракции семян, разделенных по скорости сепарирования (второй фактор).

На основе расчетных данных выполненного дисперсионного анализа в таблице представлены средние значения скорости нарастания ВП и построены графики для каждой комбинации «сорт – скорость сепарирования», приведенные на рисунках 6 и 7.

Из рисунка 6 следует, что наибольшей скоростью нарастания ВП (в среднем 0,86 мВ/мс) обладают зерна пшеницы сорта «Алтайская 75». Пшеница, собранная с первого поля, имеет урожайность 16,4 ц/га. Этот же сорт пшеницы, собранный с другого поля, имеет урожайность 35 ц/га, а скорость нарастания ВП в среднем 0,58 мВ/мс. Формы графиков очень похожи.

Поскольку посевной материал был один и тот же, свойства оболочек зерен пшеницы нового урожая сохраняют идентичность по скорости нарастания ВП. Вероятнее всего, на формирование свойств оболочки у зерен пшеницы, полученных с первого поля, существенное влияние оказало другое качество почвы. Однако у зерен этого сорта при скорости сепарирования 9 м/с наблюдаются практически одинаковые скорости нарастания ВП, что свидетельствует об одинаковых свойствах оболочек зерен. Возможно, что зерна, отсортированные при скорости 9 м/с с первого и второго полей, при высеве на одном поле дадут одинаковые результаты. Эту гипотезу планировалось проверить осенью 2020 г.

Линии графика сорта пшеницы «Тасос» в диапазоне от 8 до 10 м/с параллельны линиям графика сорта пшеницы «Алтайская 75». Сорт «Тасос» имеет среднюю скорость нарастания ВП 0,48 мВ/мс. Таким образом, является тенденция зависимости ско-



Р и с. 6. Изменения скорости нарастания ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 6. Changes in the VP rise speed depending on the separation seed for four wheat varieties

рости нарастания ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности скорость нарастания ВП уменьшается.

Результаты сорта «Гранни» являются аномальными относительно других сортов. Во-первых, форма графика отличается от других графиков и представляет монотонно убывающую функцию (рис. 6). Во-вторых, как следует из таблицы, масса 1 000 зерен составляет 29,3 г при скорости сепарирования 9 м/с. По логике масса должна быть больше, чем при скорости сепарирования 8 м/с.

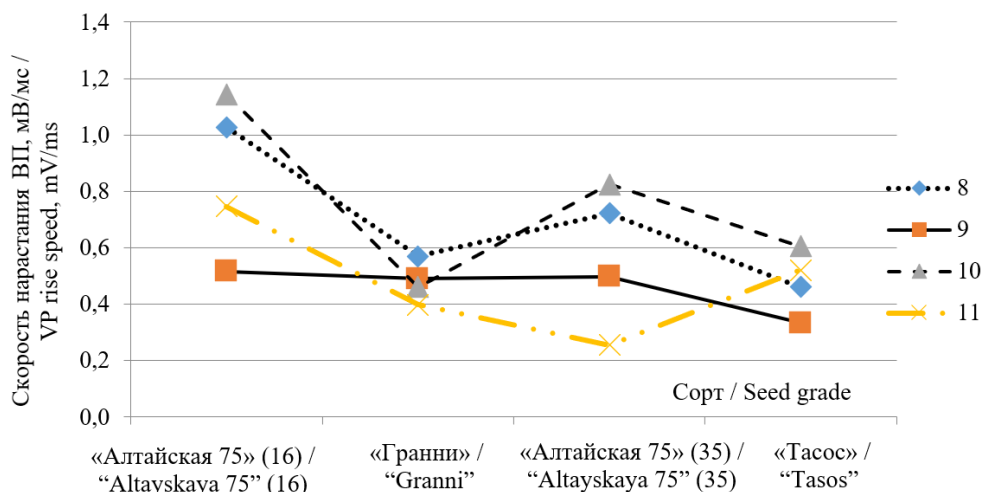
Вполне вероятно, что на этот высокоурожайный сорт тоже повлияло качество почвы. Из всего графика выделяется значение скорости нарастания ВП при скорости сепарирования 9 м/с. Это значение практически совпадает со значением сорта «Алтайская 75». Следовательно, свойства оболочек зерен пшеницы у этих сортов очень близки и, высеянные на одном и том же поле, они дают одинаковые урожаи.

Второй аномальный результат скорости нарастания ВП получен при

скорости сепарирования 11 м/с. Во-первых, наблюдается очень большой разброс по скорости нарастания ВП. Во-вторых, нарушается логический вывод: уменьшается скорость нарастания ВП – увеличивается урожайность. Причиной могут быть микротрещины в оболочках зерен, которые и влияют на изменение скорости нарастания ВП. Движение ионов через оболочку происходит не только по ионным каналам, но и микротрещинам.

Из рисунка 7 следует, что у зерен пшеницы сорта «Алтайская 75» с различными АДС наблюдаются большие расхождения в скорости нарастания ВП. Этот факт говорит о нестабильности свойств оболочки зерна. Видимо, поэтому зерна, высеянные в хорошую почву, дают высокий урожай, и наоборот. Вывод, на первый взгляд, тривиальный, но он требует конкретизации понятия «хорошая почва». Причем в сочетании со свойствами оболочки зерна.

На рисунке 7 выделяется график из фракции 9 м/с. Во-первых, в нем нет сильных изменений скорости нараста-



Р и с. 7. Изменение скорости нарастания ВП от сорта пшеницы при заданной скорости сепарирования

Fig. 7. Changes in the VP rise speed depending on the wheat variety at a given separation speed

ния ВП для всех исследованных сортов. Во-вторых, график имеет минимальные значения скорости нарастания ВП для всех сортов, исключая аномальный график при скорости сепарирования 11 м/с.

Дисперсионный анализ в целом по всем скоростям сепарирования свидетельствует об очень сильной зависимости скорости нарастания ВП от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет $5 \cdot 10^{-6}$, что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение отношения дисперсий 11,25 значительно превышает критическое значение 2,75.

Сильно влияют на скорость нарастания ВП зерен скорость их сепарирования. Уровень значимости $1,3 \cdot 10^{-4}$ меньше заданного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 7,98 превышает критическое 2,75.

Влияние взаимодействия обоих факторов на скорость нарастания ВП тоже значимо, но выражено весьма слабо. Уровень значимости составляет 0,045, а расчетное значение отношения дисперсий 2,08 незначительно превышает критическое 2,03.

При отсутствии взаимодействия между факторами графики становятся параллельными. Следовательно, при слабом взаимодействии у отдельных графиков может наблюдаться тенденция к параллельности. Она хорошо проявляется на рисунке 6 в диапазоне скорости сепарирования $8 \div 10$ м/с для сортов «Тасос» и «Алтайская 75».

По данным урожайности из первого столбца таблицы и данным скорости нарастания ВП при 9 м/с для каждого сорта вычислен коэффициент линейной корреляции: $R = 0,74$, что свидетельствует о сильной зависимости между скоростью нарастания ВП и урожайностью. Линейное уравнение скорости нарастания $v_{ВП}$ для зерен этой фракции имеет вид:

$$v_{ВП} = -0,006x + 0,62, \quad (7)$$

где x – урожайность исследуемых сортов пшеницы.

Аналогично получено линейное уравнение для зерен из фракции 8 м/с:

$$v_{ВП} = -0,016x + 1,16. \quad (8)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет $R = 0,71$. Переменная x обозначает урожайность, а коэффициент при x имеет размерность мВ-га/с-ц.

Полученные коэффициенты свидетельствуют о сильной зависимости времени нарастания ВП от урожайности при скоростях сепарирования 8 и 9 м/с.

Остальные фракции зерен имеют меньшие коэффициенты линейной корреляции 0,42 и 0,55 для фракций 10 и 11 м/с соответственно.

График на рисунке 7 при скорости сепарирования 9 м/с и уравнение (7) показывают, что линия имеет очень малый угол наклона. Следовательно, независимо от урожайности скорость нарастания ВП остается неизменной у зерен всех сортов. Значит, оболочки имеют одинаковые свойства. Исследователи выдвигают версию о том, что наибольшую урожайность дают зерна из фракций $8 \div 9$ м/с. Такая версия вполне себя оправдывает с точки зрения скорости нарастания ВП [12].

10-процентное время нарастания сигнала как третий информативный признак

10-процентное время нарастания ВП представляет собой процесс завершения деполаризации оболочки зерна. Очевидно, что нелинейное изменение ВП на временном интервале t_{10} определяется скоростью изменения проницаемости оболочки зерна.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа с повторениями получен следующий результат. Наблюдается сильная зависимость 10-процентного времени нарастания от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет $4,8 \cdot 10^{-10}$, что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение дисперсионных отношений 18,15 значительно превышает критическое значение 2,68.

Сильно влияют на 10-процентное время нарастания ВП зерна с различными скоростями сепарирования. Уровень значимости $6,99 \cdot 10^{-19}$ меньше за-

данного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 40,04 превышает критическое 2,68.

Влияние взаимодействия обоих факторов на скорость нарастания ВП тоже значимо. Уровень значимости составляет 0,02, а расчетное значение отношения дисперсий 2,29 незначительно превышает критическое 1,95.

В диапазоне скоростей сепарирования от 8 до 10 м/с наблюдается тенденция параллельности линий графиков. Параллельность означает отсутствие взаимодействия между факторами и наличие явных закономерностей при скоростях сепарирования 8 и 9 м/с (рис. 8). У зерен всех сортов наблюдается увеличение 10-процентного времени нарастания с увеличением урожайности. Особенно наглядно эти закономерности проявляются на графиках рисунка 9. Однако графики нельзя использовать для определения и анализа функциональной зависимости, потому что по оси абсцисс отражены сорта с возрастающей урожайностью, а не сами урожайности. Если по оси абсцисс задать урожайности, то для зерен из фракции 9 м/с получим зависимость, которую можно аппроксимировать линейной функцией:

$$t_{10} = 4,38x - 15,3. \quad (9)$$

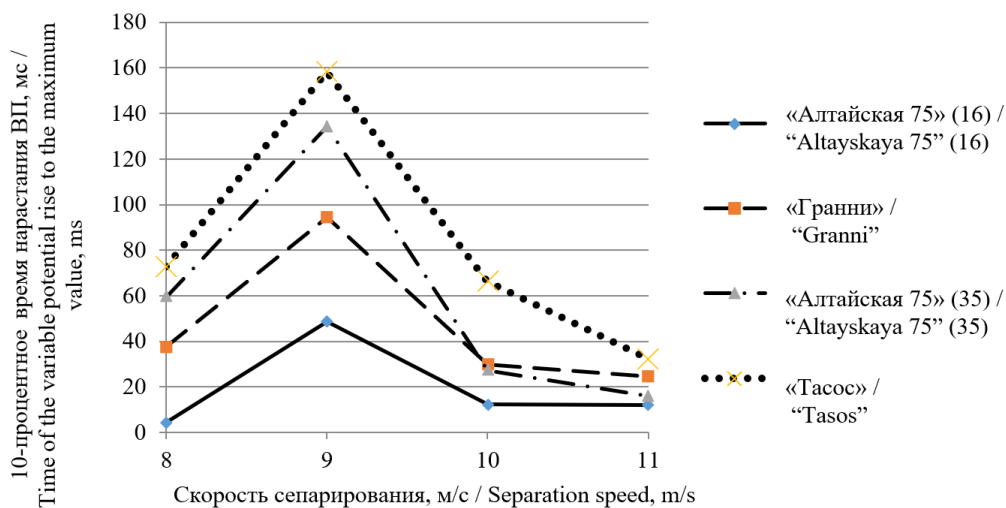
Коэффициент линейной корреляции составляет 0,982.

Аналогично можно построить линейную зависимость для зерен из фракции 8 м/с:

$$t_{10} = 2,64x - 32,24. \quad (10)$$

Коэффициент линейной корреляции составляет 0,965. Переменная x обозначает урожайность, а коэффициент при x имеет размерность с-га/ц.

Закономерное увеличение 10-процентного времени нарастания ВП с увеличением урожайности у зерен всех сортов свидетельствует о различ-



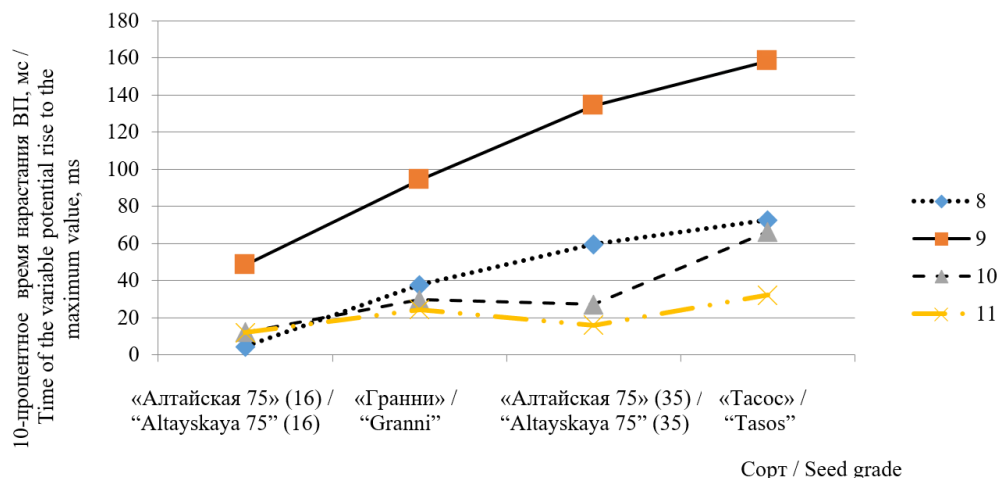
Р и с. 8. Изменения времени нарастания ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 8. Changes in the VP rise time depending on the separation speed for four wheat varieties

ном изменении скорости проницаемости оболочек. Наименьшую скорость проницаемости имеют зерна с большей урожайностью. Максимально выраженные изменения 10-процентного времени нарастания ВП от урожайно-

сти наблюдаются у зерен из фракций 8 и 9 м/с.

В перспективе, имея экспериментальный результат, можно решать обратную задачу. По значению 10-процентного времени нарастания у зерен



Р и с. 9. Изменение 10-процентного времени нарастания ВП от сорта пшеницы при заданной скорости сепарирования

F i g. 9. Changes in VP rise time to the maximum value depending on a wheat variety at a given separation speed

пшеницы из фракции 9 м/с возможно прогнозирование общей урожайности сорта по всем фракциям.

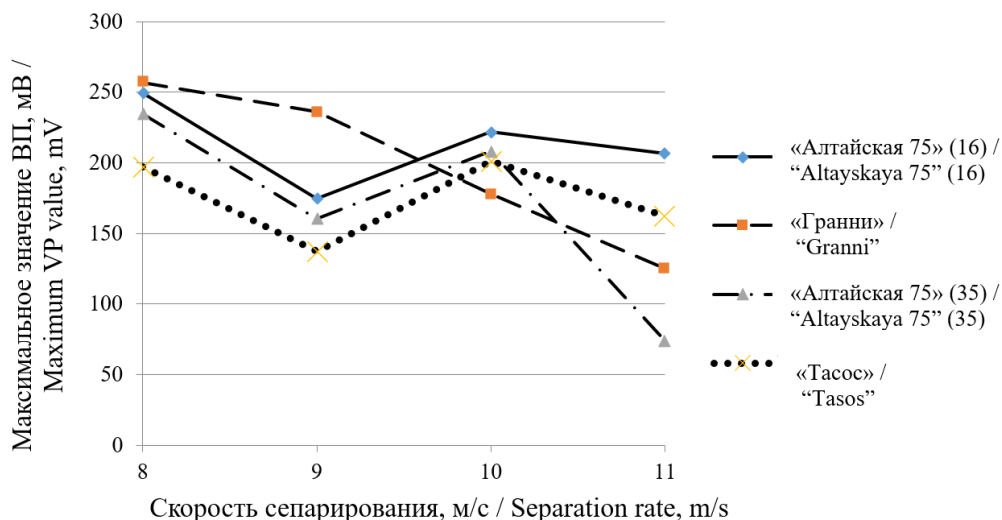
Максимальное значение вариабельного потенциала как четвертый информативный признак

Фаза деполяризации заканчивается максимальным значением ВП. Максимальное значение зависит от стимула воздействия, внешней и внутренней концентраций ионов относительно оболочки. На оболочку зерен воздействовали одним стимулом – прокаливанием. Изначально внешняя концентрация ионов отсутствовала, потому что набухание происходило под действием дистиллированной воды. Поскольку процесс деполяризации оболочки зерна происходит за счет ионов N^+ , то максимальное значение ВП определяется концентрацией ионов N^+ , содержащихся в зерне [25]. Максимальные значения ВП были определены из экспериментальных данных по каждому зерну. Для исключения «грубых» значений использовался критерий Граббса. Средние значения и доверительные интервалы, вычисленные при доверительной вероятности 0,95, отражены в таблице.

На рисунке 10 представлены изменения максимального значения ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы.

При скорости сепарирования 11 м/с наблюдаются значительные расхождения в максимальных значениях ВП у разных сортов. Зато в диапазоне от 8 до 10 м/с проявляются закономерности. В среднем максимальное значение ВП для зерен сорта «Алтайская 75» с урожайностью 16,4 ц/га выше, чем у зерен этого же сорта с урожайностью 35 ц/га. Формы графиков очень похожи. Следовательно, свойства оболочек идентичны. Большее максимальное значение ВП свидетельствует о большей концентрации ионов Na^+ у зерен с меньшей урожайностью. Вероятно, что поле, засеянное этим сортом, имело большую концентрацию соли $NaCl$.

Дисперсионный анализ в целом по всем скоростям сепарирования свидетельствует об очень сильной зависимости максимального значения ВП от сорта пшеницы. Уровень значимости составляет $2,93 \cdot 10^{-6}$, что во много раз меньше заданного уровня значимости 0,05. При этом расчетное значение ди-



Р и с. 10. Изменение максимального значения ВП от скорости сепарирования для четырех сортов пшеницы

F i g. 10. Changes in the maximum VP value depending on the separation speed for four wheat varieties
Technologies and means of agricultural mechanization

сперсионных отношений 10,44 значительно превышает критическое значение 2,67.

Сильно влияют на максимальное значение ВП разделение семян на фракции по АДС. Уровень значимости $5,34 \cdot 10^{-18}$ меньше заданного уровня значимости 0,05, а расчетное отношение дисперсий 37,57 превышает критическое 2,65.

Влияние взаимодействия обоих факторов на максимальное значение МП тоже значимо. Уровень значимости составляет $2,04 \cdot 10^{-10}$, а расчетное значение отношения дисперсий 7,74 превышает критическое 1,95.

Наблюдается тенденция зависимости максимального значения ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности максимальное значение ВП уменьшается. По данным урожайности из таблицы и средним максимальным значениям ВП получено линейное уравнение для зерен из фракции 9 м/с:

$$\max VP = -2,54x + 249, \quad (11)$$

с коэффициентом линейной корреляции $R = 0,65$.

Линейное уравнение для зерен пшеницы из фракции 8 м/с:

$$\max VP = -2,08x + 293, \quad (12)$$

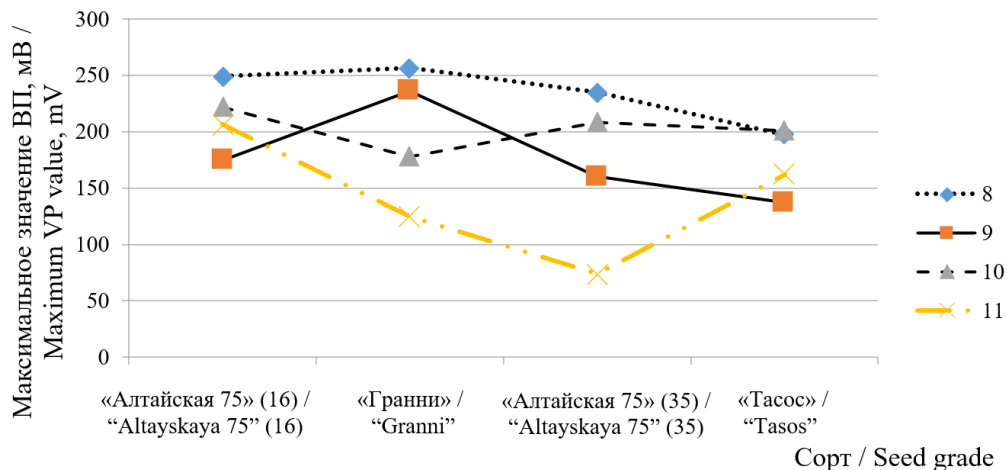
с коэффициентом линейной корреляции $R = 0,85$. Переменная x обозначает урожайность, а коэффициент при x имеет размерность мВ·га/ц.

Обсуждение и заключение

Предложена и апробирована схема включения зерна пшеницы в электрическую цепь с плоскими поверхностями электрода-зажима.

Изменения мембранного потенциала у зерен пшеницы идентичны изменениям мембранного потенциала у высших растений. По классификации ряда авторов подобные сигналы называют варибельным потенциалом.

Для исследования влияния сорта пшеницы, аэродинамических свойств зерен и урожайности на изменения варибельного потенциала были заданы четыре признака: уровень потенциала покоя; скорость нарастания варибельного потенциала на линейном участке; 10-процентное время нарастания варибельного потенциала от $0,9 \cdot \max VP$ до $\max VP$; макси-



Р и с. 11. Изменение максимального значения ВП в зависимости от сорта
 F i g. 11. Changes in the maximum VP value depending on the wheat variety

мальное значение переменного потенциала – $\max V_P$.

Выполнены измерения и анализ мембранного потенциала на оболочках зерен пшеницы, разделенных на фракции по аэродинамическим свойствам, у четырех сортов с разной урожайностью и лабораторной всхожестью в послеуборочный период.

Экспериментальные исследования и теоретический анализ потенциала покоя показали, что зерна с высокой всхожестью представляют ритмические колебания с различной частотой и амплитудой. У зерен с низкой всхожестью уровень потенциала покоя лежит в узком диапазоне его изменений. Однако статистическое усреднение по группе зерен с одними и теми же аэродинамическими свойствами приводит к близкому результату (-5 мВ) независимо от сорта. Следовательно, уровень потенциала покоя не может быть характерным отличительным признаком различия зерен пшеницы по аэродинамическим свойствам и урожайности.

В результате двухфакторного дисперсионного анализа была установлена сильная зависимость скорости нарастания сигнала, 10-процентного времени нарастания ВП и максимального значения ВП от сорта пшеницы и скорости сепарирования (аэродинамических свойств зерен).

Установлена линейная зависимость скорости нарастания ВП на линейном участке фазы деполяризации от урожайности для зерен из фракции 9 м/с. Коэффициент корреляции составил 0,74. С повышением урожайности скорость нарастания ВП на линейном участке фазы деполяризации незначительно падает. Тангенс угла наклона составляет всего $-0,006$. Для зерен из фракции 8 м/с линейная зависимость имеет коэффициент корреляции 0,71, тангенс угла наклона равен $-0,016$. Как видно из представленного результата, у зерен фракции 8 м/с с повышением урожайности скорость нарастания

ВП тоже падает, но в большей степени. Зерна из других фракций показали слабую корреляционную зависимость.

Скорость нарастания ВП характеризует проницаемость оболочек для ионов Na^+ . Чем выше проницаемость, тем больше ионов Na^+ и ниже урожайность. Незначительное изменение ВП от урожайности свидетельствует о равнозначных свойствах оболочек у зерен различных сортов. Значит, можно предположить, что зерна из фракции 9 м/с потенциально имеют высокие урожайные свойства по сравнению с другими фракциями. Исследователи тоже отмечают, что зерна пшеницы из фракций 8-9 м/с отличаются хорошими урожайными свойствами [12].

Результаты исследования 10-процентного времени нарастания ВП показали максимальную корреляцию с урожайными свойствами зерен пшеницы для всех сортов. С увеличением урожайности 10-процентное время нарастания увеличивается. Для зерен из фракции 9 м/с коэффициент линейной корреляции составил 0,98. Для зерен из фракции 8 м/с – 0,97. Зависимости отражены в линейных уравнениях (9) и (10). Увеличение 10-процентного времени нарастания ВП в фазе деполяризации характеризует уменьшение скорости проницаемости оболочек для ионов Na^+ . Меньшую скорость изменения проницаемости имеют зерна с высокой урожайностью.

Наблюдается тенденция зависимости изменения максимального значения ВП от урожайности пшеницы. С повышением урожайности максимальное значение ВП уменьшается. Получены линейные уравнения (11) и (12) для зерен пшеницы из фракции 9 и 8 м/с с коэффициентами линейной корреляции $R = 0,65$ и $R = 0,85$ соответственно. Однако из экспериментальных результатов не следует вывод, что максимальное значение ВП полностью эквивалентно концентрации ионов Na^+ , накопленных зерном. Дело в том, что при большой

скорости изменения проницаемости оболочки (малом 10-процентном времени нарастания ВП) происходит больший кратковременный выброс ионов Na^+ , а при меньшей скорости – меньший, что и определяет максимальное значение ВП. Поэтому степень эквивалентности максимального значения ВП концентрации ионов Na^+ требует дальнейшего уточнения.

При сопоставлении зависимости массы 1 000 зерен от аэродинамических свойств у сорта «Гранни» обнаружен аномальный эффект. При скорости сепарирования 9 м/с масса 1 000 зерен меньше, чем масса 1 000 зерен при скорости сепарирования 8 м/с. Аномальные свойства проявляются при исследовании

скорости нарастания ВП при скорости сепарирования 9 м/с (рис. 6) и при исследовании максимального значения ВП при той же скорости сепарирования 9 м/с (рис. 10). Уровень максимального значения ВП гораздо выше, чем у остальных сортов, что говорит о высокой концентрации ионов Na^+ .

Предполагается продолжить исследования в данном направлении для семян пшеницы разных сортов, посевного качества и урожайных свойств. А также планируется апробация полученных результатов в полевых условиях и подтверждение возможности прогнозирования урожайности семян пшеницы по полученным информативным признакам.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Захарова, Н. Н.** Урожайные свойства семян яровой мягкой пшеницы / Н. Н. Захарова // Научно-методический электронный журнал Концепт. – 2013. – Т. 3. – С. 521–525. – URL: <http://e-koncept.ru/2013/53106.htm> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

2. **Барышева, Н. Н.** Метод определения всхожести семян пшеницы на основе мембранных потенциалов / Н. Н. Барышева, С. П. Пронин. – DOI [10.15507/2658-4123.029.201903.443-455](https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455) // Инженерные технологии и системы. – 2019. – Т. 29, № 3. – С. 443–455. – URL: <http://vestnik.mrsu.ru/index.php/en/articles2-en/84-19-3/725-10-15507-0236-2910-029-201903-8> (дата обращения: 15.10.2020).

3. **Вдовина, Т. В.** Урожайные свойства семян яровой пшеницы в зависимости от основных приемов технологии выращивания / Т. В. Вдовина, П. В. Поползухин, Н. А. Поползухина // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. – 2008. – № 2 (11). – С. 54–59. – URL: http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008_2.pdf (дата обращения: 15.10.2020).

4. Интроскопический экспресс-контроль целостности внутренних структур зерновок при формировании производственных партий зерна, наиболее пригодных для длительного хранения / М. В. Архипов, Н. С. Прияткин, Л. П. Гусакова [и др.] // Селекция, семеноводство и генетика. – 2015. – № 2. – С. 53–54. – URL: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/news/smi/select/select-2-2015.pdf> (дата обращения: 15.10.2020).

5. **Архипов, М. В.** Выявление скрытой дефектности семян зерновых культур методом микрофокусной рентгенографии / М. В. Архипов, Н. С. Прияткин, Л. П. Гусакова // Таврический вестник аграрной науки. – 2018. – № 3 (15). – С. 8–13. – URL: http://tvan.niishk.ru/data/documents/1_3.pdf (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

6. **Белецкий, С. Л.** Современные принципы и технические средства сепарации семян / С. Л. Белецкий, Н. С. Прияткин, М. В. Архипов // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2018. – № 3. – С. 89–97. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennye-printsipy-i-tehnicheskie-sredstva-separatsii-semyan> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

7. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review / S. N. Jha, K. Narsaiah, A. L. Basediya [et al.]. – DOI [10.1007/s13197-011-0263-x](https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x) // Journal of Food Science and Technology. – 2011. – Vol. 48. – Pp. 387–411. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13197-011-0263-x> (дата обращения: 15.10.2020).

8. Изменение показателей качества зерна озимой ржи при его фракционировании / А. В. Пасынков, В. Л. Андреев, А. А. Завалин, Е. Н. Пасынкова // Достижения науки и техники АПК. – 2013. – № 9. – С. 36–40. – URL: <http://www.agroapk.ru/year-2013> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
9. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation / E. N. Pasynkova, A. A. Zavalin, A. V. Pasyнков, N. V. Kotelnikova. – DOI 10.3103/S1068367418050142 // Russian Agricultural Sciences. – 2018. – Vol. 44. – Pp. 409–413. – URL: <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS1068367418050142> (дата обращения: 15.10.2020).
10. Разработка методики настройки вибропневмосепаратора усовершенствованной конструкции при очистке пшеницы от трудноотделимых примесей / В. Д. Галкин, А. А. Хавыев, В. А. Хандриков [и др.] // Пермский аграрный вестник. – 2018. – № 1 (21). – С. 14–22. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-nastroyki-vibro-pnevmo-separatora-usovershenstvovannoy-konstruktsii-pri-ochistke-pshenitsy-ot-trudnootdelimyyh> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
11. Подготовка высококачественных семян с использованием пневмосепараторов / А. И. Бурков, Г. А. Баталова, А. Л. Глушков, В. А. Ладыкин // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. – 2017. – № 2 (57). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/podgotovka-vysokokachestvennyh-semyan-s-ispolzovaniem-pnevmo-separatorov> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.
12. Снижение травмирования зерна при послеуборочной обработке // Вестник аграрной науки Дона / А. П. Тарасенко, В. И. Оробинский, А. М. Гиевский [и др.] – 2019. – № 1. – С. 63–68. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-travmirovaniya-zerna-pri-posleuborochnoy-obrabotke/viewer> (дата обращения: 15.10.2020).
13. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds / T. Zhang, W. Wei, B. Zhao [et al.]. – DOI 10.3390/s18030813 // Sensors – 2018. – Vol. 18, Issue 3. – Pp. 813. – URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/18/3/813> (дата обращения: 15.10.2020).
14. **Anisur, R.** Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review / R. Anisur, Ch. Byoung-Kwan. – DOI 10.1017/S0960258516000234 // Seed Science Research. – 2016. – Vol. 26, Issue 4. – Pp. 285–305. – URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/seed-science-research/article/assessment-of-seed-quality-using-nondestructive-measurement-techniques-a-review/CA4DAA31C7642A0BC38AD944448BCCC9> (дата обращения: 15.10.2020).
15. **Макрушин, Н. М.** Важнейшие принципы прогнозирования биологических свойств и отбора семян / Н. М. Макрушин, Е. М. Макрушина // Наукові праці Південного філіалу «Кримський агротехнологічний університет» Національного аграрного університету. – 2009. – Вып. 127. – С. 11–15. – URL: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=110996 (дата обращения: 15.10.2020).
16. Conditioning Shriveled Soybean Seed Part I. Variation in Physical Properties / J. H. Risse, M. K. Misra, A. D. Knapp, C. J. Bern. – DOI 10.13031/2013.31687 // Transactions of the ASAE. – 2013. – Vol. 34, Issue 2. – Pp. 481–486. – URL: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=3&AID=31687&CID=t1991&v=34&i=2&T=1> (дата обращения: 15.10.2020).
17. **Phenow, E. A.** Experimental Study of Parameters of Grain Milling Product Separation in Pneumatic Screw Classifier / E. A. Phenow, A. A. Mezenov, Y. Y. Gigoolo. – DOI 10.13005/bbra/2083 // Biosciences Biotechnology Research Asia. – 2016. – Vol. 13, Issue 2. – Pp. 669–680. – URL: <http://www.biotech-asia.org/vol13no2/experimental-study-of-parameters-of-grain-milling-product-separation-in-pneumatic-screw-classifier/> (дата обращения: 15.10.2020).
18. **Bettge, A. D.** Air-Aspirated Cleaning to Separate Sound from Preharvest-Sprouted Wheat / A. D. Bettge, Y. Pomeranz // Cereal Chemistry. – 1993. – Vol. 70, Issue 1. – Pp. 36–41. – URL: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9416316> (дата обращения: 15.10.2020).
19. **Куценко, Ю. Н.** Обоснование структуры электрооборудования и системы автоматизированного управления установки сепарации зерновых культур / Ю. Н. Куценко // Вестник аграрной науки Дона. – 2014. – № 2 (26). – С. 15–19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-struktury-elektrooborudovaniya-i-sistemy-avtomatizirovannogo-upravleniya-ustanovki-separatsii-zernovykh-kultur/viewer> (дата обращения: 15.10.2020).

20. **Orobinsky, V. I.** Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process / V. I. Orobinsky, A. M. Gievsky, I. V. Baskhakov. – DOI [10.2991/agrosmart-18.2018.163](https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163) // International Scientific and Practical Conference “AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture” (AgroSMART 2018) – 2018. – URL: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/agrosmart-18/55908808> (дата обращения: 15.10.2020).

21. **Мерченко, Н. Н.** Зависимость мембранного потенциала зерен пшеницы от концентрации ионов на внутренней стороне оболочки и ее проницаемости / Н. Н. Мерченко, С. П. Пронин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8. – С. 1539–1544. – URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35248> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

22. Распространение переменного потенциала, индуцированного ожогом семядольного листа проростка тыквы / В. А. Воденев, Р. В. Мамонов, С. С. Пятагин, В. А. Опритов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2007. – № 2. – С. 122–126. – URL: <http://www.vestnik.unn.ru/ru/nomera?anum=1643> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

23. **Воденев, В. А.** Электрические сигналы у высших растений: механизмы генерации и распространения / В. А. Воденев, Л. А. Катичева, В. С. Сухов // Биофизика. – 2016. – Т. 61, № 3. – С. 598–606. – Рез. англ.

24. **Pyatygin, S. S.** Signaling Role of Action Potential in Higher Plants / S. S. Pyatygin, V. A. Opritov, V. A. Vodenev. – DOI [10.1134/S1021443708020179](https://doi.org/10.1134/S1021443708020179) // Russian Journal of Plant Physiology. – 2008. – Vol. 55, Issue 2. – Pp. 285–291. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2F51021443708020179> (дата обращения: 15.10.2020).

25. **Hodgkin, A. L.** A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve / A. L. Hodgkin, A. F. Huxley. – DOI [10.1007/BF02459568](https://doi.org/10.1007/BF02459568) // Bulletin of Mathematical Biology. – 1990. – Vol. 52. – Pp. 25–71. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02459568> (дата обращения: 15.10.2020).

26. **Хлебова, Л. П.** Оценка возможности сокращения периода покоя семян зерновых культур в регулируемых условиях выращивания / Л. П. Хлебова, А. А. Арзумян. – DOI [10.14258/abs.v1i1-2.780](https://doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.780) // Acta Biologica Sibirica. – 2015. – № 1–2. – С. 22–37. – URL: <http://journal.asu.ru/index.php/biol/article/view/780> (дата обращения: 15.10.2020). – Рез. англ.

Поступила 12.06.2020; принята к публикации 15.09.2020; опубликована онлайн 30.12.2020

Об авторах:

Барышева Надежда Николаевна, доцент кафедры информационных систем в экономике ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), кандидат технических наук, Researcher ID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, mnn-t@mail.ru

Пронин Сергей Петрович, профессор кафедры информационных технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), доктор технических наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-2609>, spronin@mail.ru

Барышев Денис Дмитриевич, старший преподаватель кафедры информационных систем в экономике ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» (656038, Российская Федерация, г. Барнаул, пр-т Ленина, д. 46), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-6919>, denis.baryshev@bk.ru

Беляев Владимир Иванович, заведующий кафедрой сельскохозяйственной техники и технологий ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет» (656049, Российская Федерация, г. Барнаул, Красноармейский пр-т, д. 98), доктор технических наук, профессор, prof-belyaev@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Н. Н. Барышева – обзор литературы, разработка методик, анализ результатов исследования, формулировка выводов, эксперименты, подготовка первоначального варианта статьи; С. П. Про-

нин – проведение теоретических исследований, формулировка основных концепций исследования, окончательное редактирование текста; Д. Д. Барышев – корректировка текста, исправление выводов; В. И. Беляев – окончательное редактирование текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Zakharova N.N. Yield Properties of Seeds of Spring Wheat. *Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal Kontsept* = Scientific and Methodological Electronic Journal Concept. 2013; 3:521-525. Available at: <http://e-koncept.ru/2013/53106.htm> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
2. Barysheva N.N., Pronin S.P. Method of Determining Seed Germination by Using Membrane Potential of Wheat Seeds. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2019; 29(3):443-455. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201903.443-455>
3. Vdovina T.V., Popolzukhin P.V., Popolzukhina N.A. [Yield Properties of Spring Wheat Seeds Depending on the Main Methods of Cultivation Technology]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii im. V.R. Filippova* = Filippov Buryat State Agricultural Academy Bulletin. 2008; (2):54-59. Available at: http://www.bgsha.ru/files/images/Vestnik/2008_2.pdf (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
4. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P., et al. [Introsopic Express Control of the Integrity of Internal Grain Structures during the Formation of Production Lots of Grain, Most Suitable for Long-Term Storage]. *Selektsiya, semenovodstvo i genetika* = Breeding, Seed and Genetics. 2015; (2):53-54. Available at: <https://fsvps.gov.ru/fsvps-docs/ru/news/smi/select/select-2-2015.pdf> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
5. Arkhipov M.V., Priyatkin N.S., Gusakova L.P. Detection of Hidden Defects in the Seeds of Grain Crops by the Method of Microfocus X-RAY. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of the Agrarian Sciences. 2018; (3):8-13. Available at: http://tvann.niishk.ru/data/documents/1_3.pdf (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
6. Beletskiy S.L., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V. Novel Principles and Technical Solutions of Seeds Sorting. *Khranenie i pererabotka selkhozsyirya* = Storage and Processing of Farm Products. 2018; (3):89-97. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyye-printsipy-i-tehnicheskie-sredstva-separatsii-semyan> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
7. Jha S.N., Narsaiah K., Basediya A.L., et al. Measurement Techniques and Application of Electrical Properties for Nondestructive Quality Evaluation of Foods – A Review. *Journal of Food Science and Technology*. 2011; 48:387-411. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0263-x>
8. Pasyнков A.V., Andreev V.L., Zavalin A.A., et al. Changes in the Parameters of Winter Rye Quality after Grain Fractionation. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2013; (9):36-40. Available at: <http://www.agroapk.ru/year-2013> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
9. Pasynkova E.N., Zavalin A.A., Pasyнков A.V., et al. Change in Quality Parameters of Hulled Oats Grain at Fractionation. *Russian Agricultural Sciences*. 2018; 44:409-413. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068367418050142>
10. Galkin V.D., Khavyev A.A., Khandrikov V.A., et al. Development of Adjustment Method for Vibro-Pneumatic Separator with an Improved Design by the Wheat Purification from Hard-Separable Impurities. *Permskiy agrarnyy vestnik* = Perm Agrarian Journal. 2018; (1):14-22. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-metodiki-nastroyki-vibropnevmostparatora-usovershenstvovannoy-konstruksii-pri-ochistke-pshenitsy-ot-trudnootdelimyyh> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
11. Burkov A.I., Batalova G.A., Glushkov A.L., et al. Preparation of High Quality Seeds Using a Pneumatic Separator. *Agrarnaya nauka Yevro-Severo-Vostoka* = Agrarian Science of Euro-North-East. 2017; (2). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/podgotovka-vysokokachestvennyh-semyan-s-ispolzovaniem-pnevmostparatorov> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)
12. Tarasenko A.P., Orobinskiy V.I., Gievskiy A.M., et al. [Reducing Injury to Grain During Post-Harvest Processing]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2019; (1):63-68. Avail-

lable at: <https://cyberleninka.ru/article/n/snizhenie-travmirovaniya-zerna-pri-posleuborochnoy-obrabotke/viewer> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

13. Zhang T., Wei W., Zhao B., et al. A Reliable Methodology for Determining Seed Viability by Using Hyperspectral Data from Two Sides of Wheat Seeds. *Sensors*. 2018; 18(3):813. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.3390/s18030813>

14. Anisur R., Byoung-Kwan Ch. Assessment of Seed Quality Using Non-Destructive Measurement Techniques: A Review. *Seed Science Research*. 2016; 26(4):285-305. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1017/S0960258516000234>

15. Makrushin N.M., Makrushina Ye.M. [The Most Important Principles of Biological Properties Prediction and Seed Selection]. *Naukovi pratsi Pivdennoho filialu "Krimskiy agrotekhnologichniy universitet" Natsionalnoy agrarnogo universitetu* = Scientific Works of the Southern Branch Crimean Agrotechnological University of National Agrarian University. 2009; 127:11-15. Available at: http://www.cnsnb.ru/jour/j_as.asp?id=110996 (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

16. Risse J.H., Misra M.K., Knapp A.D., et al. Conditioning Shriveled Soybean Seed Part I. Variation in Physical Properties. *Transactions of the ASAE*. 2013; 34(2):481-486. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.31687>

17. Phenow E.A., Mezenov A.A., Gigoolo Y.Y. Experimental Study of Parameters of Grain Milling Product Separation in Pneumatic Screw Classifier. *Biosciences Biotechnology Research Asia*. 2016; 13(2):669-680. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.13005/bbra/2083>

18. Bettge A.D., Pomeranz Y. Air-Aspirated Cleaning to Separate Sound from Preharvest-Sprouted Wheat. *Cereal Chemistry*. 1993; 70(1):36-41. Available at: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9416316> (accessed 15.10.2020). (In Eng.)

19. Kutsenko Yu.N. [Justification of Electric Equipment Structure and Automated Control System of Grain Separation Plant]. *Vestnik agrarnoy nauki Dona* = Don Agrarian Science Bulletin. 2014; (2):15-19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-struktury-elektrooborudovaniya-i-sistemy-avtomatizirovannogo-upravleniya-ustanovki-separatsii-zernovyh-kultur/viewer> (accessed 15.10.2020). (In Eng.)

20. Orobinsky V.I., Gievsky A.M., Baskhakov I.V. Seed Refinement in the Harvesting and Post-Harvesting Process. In: International Scientific and Practical Conference "AgroSMART – Smart Solutions for Agriculture" (AgroSMART 2018). 2018. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.2991/agrosmart-18.2018.163>

21. Merchenko N.N., Pronin S.P. Dependence of Membrane Potential of Wheat Seeds on Ions Concentration on the Cover Inside and Its Permeability. *Fundamentalnye issledovaniya* = Fundamental Research. 2014; (8):1539-1544. Available at: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35248> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

22. Vodeneev V.A., Mamonov R.V., Pyatygin S.S., et al. [Spread of Variability Potential Induced by a Burned Seed Gourd Leaf]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo* = Lobachevsky Nizhny Novgorod University Bulletin. 2007; (2):122-126. Available at: <http://www.vestnik.unn.ru/numera?anum=1643> (accessed 15.10.2020). (In Russ.)

23. Vodeneev V.A., Katicheva L.A., Sukhov V.S. Electrical Signals in Higher Plants: Mechanisms of Generation and Propagation. *Biofizika* = Biophysics. 2016; 61(3):598-606. (In Russ.)

24. Pyatygin S.S., Opritov V.A., Vodeneev V. A. Signaling Role of Action Potential in Higher Plants. *Russian Journal of Plant Physiology*. 2008; 55(2):285-291. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443708020179>

25. Hodgkin A.L., Huxley A.F. A Quantitative Description of Membrane Current and Its Application to Conduction and Excitation in Nerve. *Bulletin of Mathematical Biology*. 1990; 52:25-71. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02459568>

26. Khlebova L.P., Arzumanyan A.A. Studying the Possibility of Reducing the Period of Seed Dormancy in Crops under Controlled Growth Conditions. *Acta Biologica Sibirica*. 2015; (1-2):22-37. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.14258/abs.v1i1-2.780>

Received 12.06.2020; revised 15.09.2020; published online 30.12.2020

About the authors:

Nadezhda N. Barysheva, Associate Professor of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), Cand.Sc. (Engineering), Researcher ID: C-9650-2019, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1338-9740>, mnn-t@mail.ru

Sergey P. Pronin, Professor of Chair of Information Technology, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5066-2609>, spronin@mail.ru

Denis D. Baryshev, Senior Lecturer of Chair of Information Systems in Economy, Polzunov Altai State Technical University (46 Prospekt Lenina, Barnaul 656038, Russian Federation), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0112-6919>, denis.baryshev@bk.ru

Vladimir I. Belyaev, Head of Chair of Agricultural Machinery and Technology, Altai State Agricultural University (98 Krasnoarmeyskiy Prospekt, Barnaul 656049, Russian Federation), D.Sc. (Engineering), Professor, prof-belyaev@yandex.ru

Contribution of the authors:

N. N. Barysheva – review of literature, development of methodology, analysis of research results, formulation of conclusions, experiments, preparation of the initial version of the article; S. P. Pronin – theoretical research, formulation of the main research concepts, final text editing; D. D. Baryshev – text correction, correction of conclusions; V. I. Belyaev – final text editing.

All authors have read and approved the final manuscript.