



УДК 631.362-047.37

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-233-3-91-98

В.А. Угаров, С.Ф. Сороченко

V.A. Ugarev, S.F. Sorochenko

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДСЕВНОГО РЕШЕТА ЦЕНТРОБЕЖНО-РЕШЕТНОГО СЕПАРАТОРА С ЛОПАСТНЫМ АКТИВАТОРОМ

### LABORATORY STUDIES OF CLEANING SCREEN OF CENTRIFUGAL SIEVE SEPARATOR WITH VANE ACTIVATOR

**Ключевые слова:** зерновой ворох, сепаратор, горизонтальное центробежное решето, активатор, режимы движения сыпучей среды, мелкие примеси, полнота выделения.

Разрабатываемый в АлтГТУ горизонтальный центробежно-решетный сепаратор с лопастным активатором содержит подсевное и колосовое решета, предназначенные для выделения из зернового вороха, соответственно, мелких и крупных примесей. Цель исследования – экспериментальное исследование работы подсевного решета центробежно-решетного сепаратора с лопастным активатором. Разработана и изготовлена лабораторная установка, позволяющая оценить качество работы подсевного решета горизонтального центробежно-решетного сепаратора. Вначале исследовалась работа цилиндрического решета без активатора. Увеличение частоты вращения цилиндрического решета и, соответственно, кинематического режима приводит к интенсификации выделения мелких примесей. Увеличение полноты выделения мелких примесей происходит по линейной зависимости, а при дальнейшем увеличении частоты вращения – по квадратичной зависимости с максимумом при частоте вращения 74 об/мин. При рассмотренных частотах вращения решета определены режимы движения зернового вороха – от перекатного до водопадного. Интенсивность выделения мелких примесей достигается за счет разрыхления сегмента зернового вороха, а также увеличения

расстояния, пройденного зерновым ворохом по решету. Определены конструктивные параметры и режимы работы предлагаемого сепаратора с активатором: параметры подсевного решета – диаметр 0,61 м и частота вращения – 45 об/мин.; параметры лопастного активатора – диаметр и частота вращения 0,2 м и 500 об/мин., шаг и ширина лопаток – 60 и 100 мм соответственно. Полнота выделения мелких примесей в сравнении с цилиндрическим решетом при частоте вращения 45 об/мин. повысилась с 0,52 до 0,94, т.е. в 1,8 раза. При увеличении влажности зернового вороха с 10,6 до 25,3% полнота выделения мелких примесей снизилась с 0,94 до 0,83.

**Keywords:** grain heap, separator, horizontal centrifugal sieve, activator, loose medium movement modes, fine impurities, separation completeness.

The horizontal centrifugal sieve separator with a vane activator being developed at the Polzunov Altai State Technical University contains cleaning and head screens designed to separate small and large impurities from the grain heap, respectively. The research goal is an experimental study of the operation of the cleaning screen of a centrifugal sieve separator with a vane activator. A laboratory installation was developed and manufactured to evaluate the quality of the cleaning screen operation in the horizontal centrifugal sieve separator. Initially, the operation of the cylindrical screen without activator was investigated.

Increase of the rotational speed of the cylindrical screen and, accordingly, increased kinematic mode leads to the intensification of fine impurity separation. The increase of fine impurity separation completeness occurs according to a linear dependence, and with further increase of the rotational speed - according to a quadratic dependence with the maximum at a rotational speed of 74 rpm. With the considered rotation frequencies of the screen, the modes of movement of the grain heap were determined - from rolling to waterfall modes. The intensity of fine impurity separation is achieved by loosening the segment of the grain heap as well as increasing the distance "traveled" by

the grain heap through the screen. The design parameters and operating modes of the proposed separator with an activator are determined: the parameters of the cleaning screen - 0.61 m in diameter and 45 rpm in rotation; vane activator - 0.2 m in diameter and 500 rpm in rotation; vane spacing and width - 60 and 100 mm, respectively. Fine impurity separation completeness in comparison with the cylindrical screen at a rotation speed of 45 rpm increased from 0.52 to 0.94, i.e. 1.8 times. With increased moisture content of the grain heap from 10.6% to 25.3%, fine impurity separation completeness decreased from 0.94 to 0.83.

**Угаров Василий Андреевич**, ассистент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: ugarovskb@yandex.ru.

**Сороченко Сергей Федорович**, д.т.н., профессор кафедры, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sorochenkosf@list.ru.

**Ugarov Vasiliy Andreevich**, Asst., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: ugarovskb@yandex.ru.

**Sorochenko Sergey Fedorovich**, Dr. Tech. Sci., Chair Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sorochenkosf@list.ru.

### Введение

Разрабатываемый в АлтГТУ горизонтальный центробежно-решетный сепаратор с лопастным активатором [1] содержит подсевное и колосовое решета, предназначенные для выделения из зернового вороха, соответственно, мелких и крупных примесей. Теоретически определены параметры цилиндрического решета и активатора [2] и высказано предположение о необходимости экспериментальных исследований.

**Целью** работы является исследование подсева решета центробежно-решетного сепаратора с лопастным активатором.

### Объекты и методы

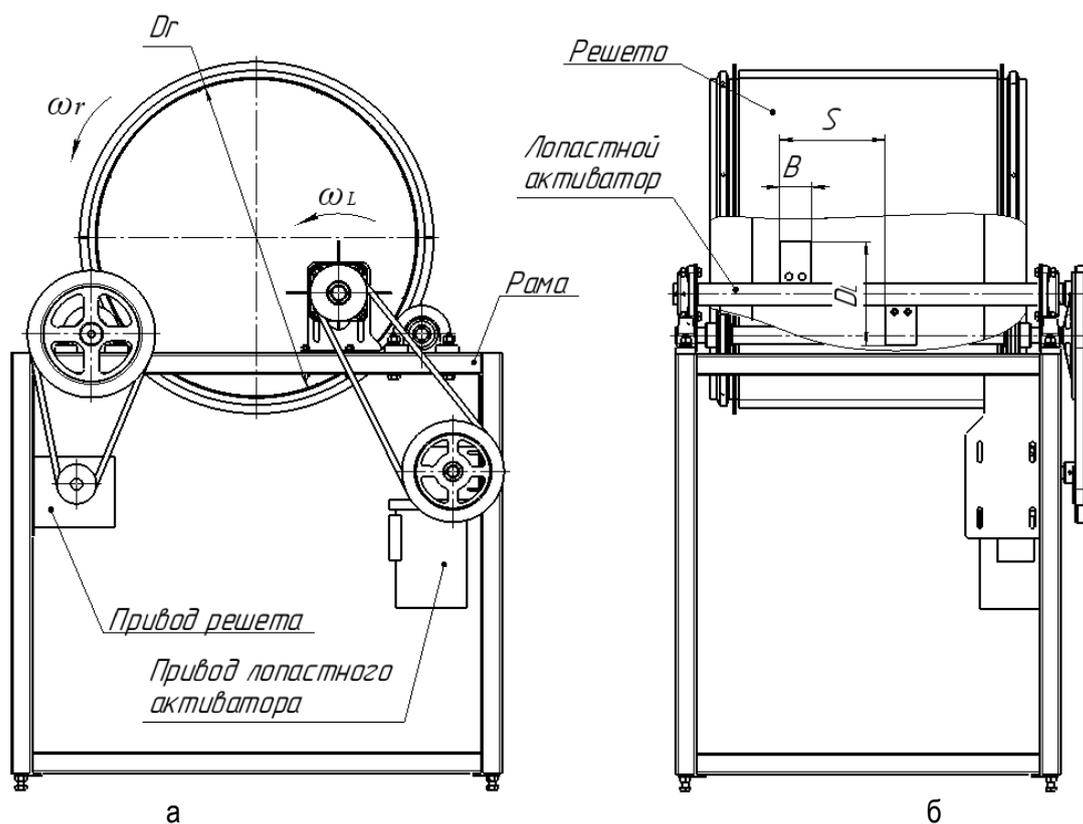
Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях в Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова (рис. 1). Исследовалась работа подсева решета сепаратора.

Лабораторная установка содержит цилиндрическое решето, изготовленное из решета МЗС-25 с продолговатыми отверстиями размером 2x20 мм. Цилиндрическое решето имеет диаметр  $D_r = 0,61$  м, длину  $L_r = 0,46$  м, отверстия ориентированы длинной стороной перпендикулярно оси решета. Привод цилиндрического решета осуществляется клиноременной передачей, причем ремень закреплен наружной поверхностью на внешней поверхности цилиндрического решета, а направляющие ролики, установленные в нижней его части, служат так-

же в качестве приводных устройств (шкивов). Частота вращения изменяется частотными преобразователями: цилиндрического решета – в интервале от 40 до 80 об/мин.; лопастного активатора – в интервале от 420 до 540 об/мин.

Исследования проведены на зерновом ворохе, содержащем семена яровой пшеницы Алтайская 70 и мелкие примеси – семена сорных растений (проход через лабораторное сито с рабочим размером 2,0 мм). Свойства компонентов зернового вороха: объемная масса пшеницы и мелкой примеси – 790 и 590 кг/м<sup>3</sup> соответственно; масса тысячи семян пшеницы – 36,3 г. Влажность зернового вороха определяли по ГОСТ 13586.5-2015. Начальное содержание мелких примесей составляло 10%, степень заполнения цилиндрического решета зерновым ворохом – 0,1. Зерновой ворох обрабатывали в течение 10 с при установившемся режиме работы цилиндрического решета и лопастного активатора. Оценку качества работы цилиндрического решета проводили по полноте выделения мелких примесей по ГОСТ 33735-2016. Эксперименты осуществлялись с трёхкратной повторностью.

Экспериментальные исследования включали следующие работы: изучение работы подсева цилиндрического решета (без активатора); определение рационального количества лопаток и частоты вращения активатора; исследование влияния влажности на работу подсева решета.



**Рис. 1. Лабораторная установка:**  
**а, б – схема установки (вид спереди и сбоку); в – общий вид**

**Результаты исследований и их обсуждение**

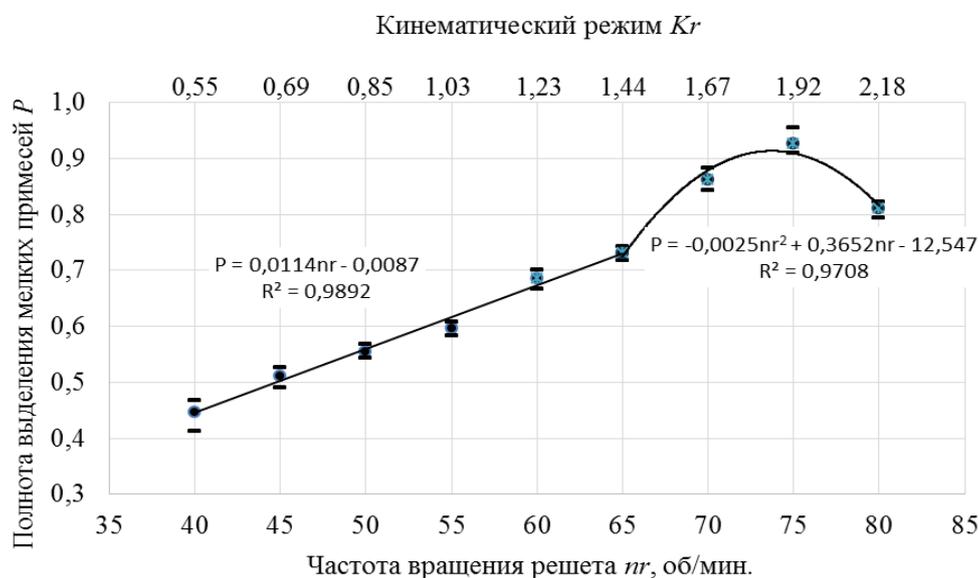
Результаты исследования влияния частоты вращения цилиндрического решета (без активатора) на полноту выделения мелких примесей приведены на рисунке 2.

Увеличение частоты вращения цилиндрического решета и, соответственно, кинематического режима приводит к интенсификации выделения мелких примесей. Однако до 65 об/мин. полнота выделения мелких примесей увеличи-

вается по линейной зависимости, а затем, по мере дальнейшего увеличения частоты вращения, – по квадратичной, достигая максимума при частоте вращения 74 об/мин. ( $P = 0,92$ ). При низких частотах вращения решета (от 40 до 50 об/мин.) центр сегмента зернового вороха смещён относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось решета, причём верхняя и нижняя границы сегмента практически неподвижны (рис. 3а). При частотах вращения от 55

до 65 об/мин. (рис. 3б) верхняя граница сегмента зернового вороха смещается и разрыхляется, но основное тело сегмента зернового вороха примерно постоянно. С.Е. Андреевым [3] и А.В. Сланевским [4] определены режимы движения сыпучей среды в горизонтальных вращающихся цилиндрах: челночный, перекатный, смешанный (перекатно-водопадный), водопадный, трубчатый. В.А. Патрин [5] и В.А. Крум [6] дополнительно установили в результате исследований порционный режим движения. Можно предположить, что при частотах вращения решета от 40 до 65 об/мин. наблюдаем перекатный и смешанный режимы движения зернового вороха. Интенсивность выделения мелких примесей в этом случае достигается за счет увеличения и разрыхления сегмента зернового воро-

ха, а также увеличения расстояния, пройденного сегментом зернового вороха по решету. Так, при частоте вращения цилиндрического решета 40 об/мин. путь, пройденный сегментом за 10 с, равен 12,8 м, а при 65 об/мин. – 20,8 м. Учитывая, что зерновой ворох имеет некоторую подвижность, а продолговатые отверстия ориентированы длинной стороной перпендикулярно продольной оси цилиндрического решета, то мелкие частицы проходят сквозь слой семян основной культуры и через отверстия решета. Начиная с частоты вращения цилиндрического решета 65 об/мин. границы сегмента расширяются, образуя элементы водопадного режима движения (рис. 3б, в), что и явилось причиной роста интенсивности выделения мелких примесей.



**Рис. 2. График зависимости полноты выделения мелких примесей от частоты вращения цилиндрического решета (влажность зернового вороха  $W = 10,6\%$ )**

При частоте вращения решета 80 об/мин. частицы зернового вороха отрываются от поверхности решета, совершают полет и затем падают на поверхность сегмента (рис. 3 г). Как следствие, интенсивность сепарации зернового вороха снижается.

При использовании активатора, лопасти которого направляют зерновой ворох на свободную поверхность цилиндрического решета, частота вращения решета может быть значительно ниже оптимального значения, установленного для цилиндрического решета без активатора. Учитывая также, что очистка цилиндрического решета от застрявших в отверстиях частиц зависит от частоты вращения решета, в дальней-

ших исследованиях работы сепаратора с активатором принята  $n_r = 45$  об/мин.

Интенсивность перемешивания и перебрашивания порций зернового вороха на свободную часть цилиндрического решета зависит от конструктивных параметров активатора (ширины  $B$  и шага  $S$  лопаток), а также от его частоты вращения. Ширина лопаток в соответствии с работой [7] принята равной 60 мм. Так как длина подсева решета лабораторной установки равна 0,46 м, то установкой двух лопаток с углом между ними  $180^\circ$  обеспечили шаг лопаток  $S = 165$  мм, четырех лопаток (угол между лопатками  $90^\circ$ ) –  $S = 100$  мм, шести лопаток (угол между лопатками  $90^\circ$ ) –  $S = 70$  мм. Диаметр ло-

пастного активатора равен  $D_L = 0,2$  м [2]. Результаты исследования влияния количества ло-

паток активатора на полноту выделения мелких примесей приведены на рисунке 4.

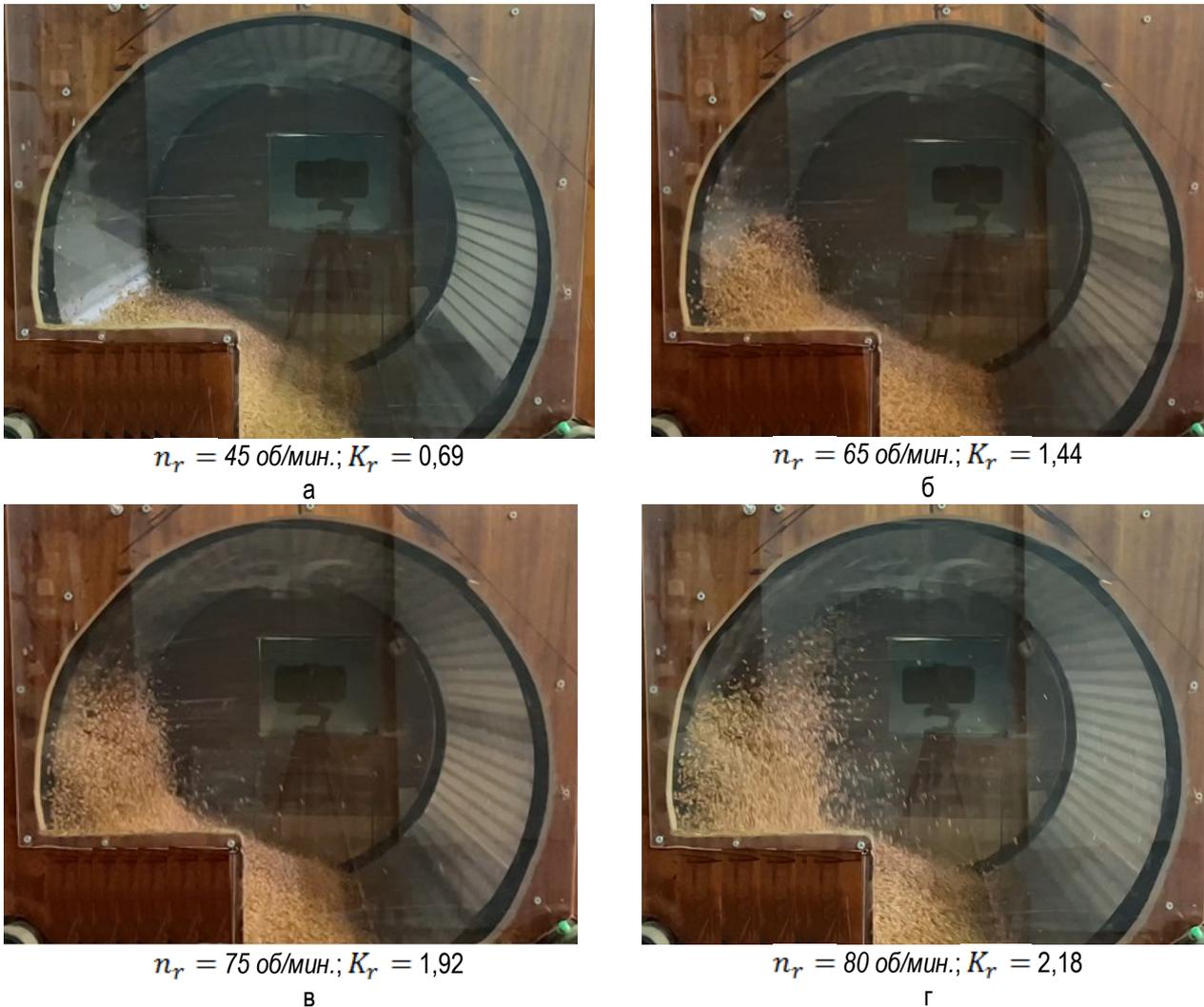


Рис. 3. Вид сегмента зернового вороха при различной частоте вращения цилиндрического решета

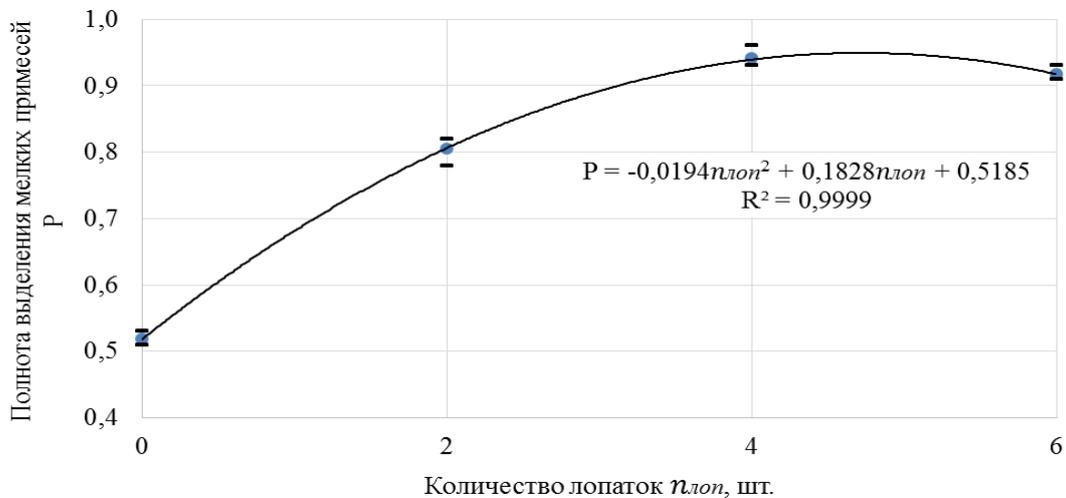


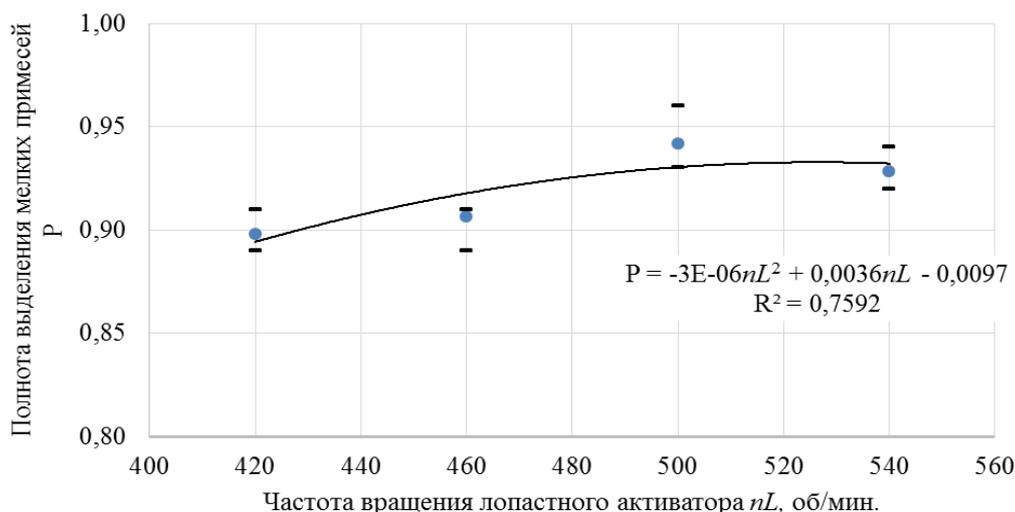
Рис. 4. График зависимости полноты выделения мелких примесей от количества лопаток активатора (частота вращения лопастного активатора  $n_L = 500$  об/мин.,  $n_r = 45$  об/мин.,  $W = 10,6\%$ )

С уменьшением шага лопаток интенсивность перемешивания и перебрасывания порций зернового вороха на свободную часть цилиндрического решета увеличивается, но, как показали эксперименты, при  $S = 100$  мм полнота выделения мелких примесей является наибольшей, что хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований [7].

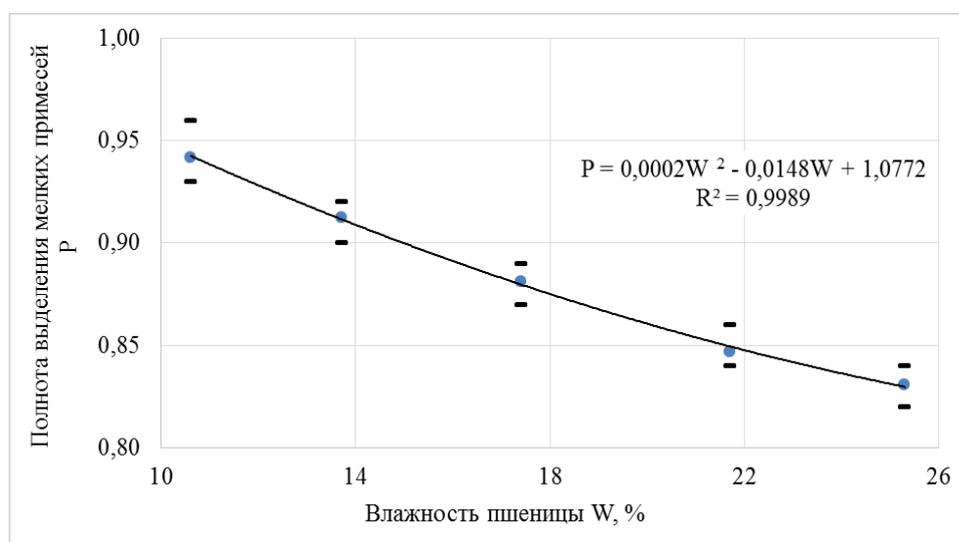
На интенсивность сепарации зернового вороха также влияет частота вращения лопастного

активатора, и, как показали лабораторные исследования, наибольшая полнота выделения примесей наблюдалась при частоте вращения активатора 500 об/мин. (рис. 5).

В сравнении с работой центробежного решета при частоте вращения цилиндрического решета 45 об/мин., в предложенной конструкции полнота выделения мелких примесей повысилась с 0,52 до 0,94, т.е. в 1,8 раза.



**Рис. 5. График зависимости полноты выделения мелких примесей от частоты вращения лопастного активатора ( $n_r = 45$  об/мин.,  $n_{\text{лоп}} = 4$  шт.,  $W = 10,6\%$ )**



**Рисунок 6 – График зависимости полноты выделения мелких примесей от влажности зернового вороха ( $n_r = 45$  об/мин.,  $n_L = 500$  об/мин.,  $n_{\text{лоп}} = 4$  шт.)**

Влажность исходного зернового вороха является важным фактором, влияющим на производительность и качественные показатели зерноочистительных машин. Для оценки влияния влажности зернового вороха на работу разрабатываемого сепаратора провели серию экспери-

ментов, увлажняя компоненты зернового вороха, в данном случае зерна и мелких примесей, отдельно. Для увлажнения компонентов определяли массу воды, которую необходимо добавить для получения заданной влажности, затем добавляли воду в зерновой ворох при непре-

рывном перемешивании и выдерживали не менее суток.

Результаты исследования влияния влажности зернового вороха на полноту выделения мелких примесей в центробежно-решетном сепараторе с активатором приведены на рисунке 6. С увеличением влажности зернового вороха с 10,6 до 25,3% полнота выделения мелких примесей снизилась с 0,94 до 0,83.

### Заключение

1. Лабораторными исследованиями горизонтального центробежного решета установлено, что интенсивность выделения мелких примесей достигается за счет увеличения расстояния, «пройденного» зерновым ворохом по решету, разрыхления и растягивания сегмента зернового вороха.

2. Применение лопастного активатора приводит к повышению эффективности работы сепаратора – при частоте вращения цилиндрического решета 45 об/мин. полнота выделения мелких примесей увеличилась с 0,52 до 0,94, т.е. в 1,8 раза. При увеличении влажности зернового вороха с 10,6 до 25,3% полнота выделения мелких примесей снизилась с 0,94 до 0,83.

### Библиографический список

1. Патент на полезную модель № 211543 Российская Федерация, МПК А01F 12/44 (2006.01). Зерноочистительная машина: № 2022104107: заявл. 16.02.2022: опубл. 14.06.2022 / Угаров В. А., Сороченко С. Ф., Даудов Г. Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет». – 7 с. – Текст: непосредственный.

2. Угаров, В. А. Исследование движения зернового вороха в горизонтальном центробежно-решетном сепараторе с активатором / В. А. Угаров, С. Ф. Сороченко. DOI 10.53083/1996-4277-2023-224-6-90-99. – Текст: электронный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2023. – № 6 (224). – С. 90-99. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54052036>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

3. Андреев, С. Е. О внутреннем трении в шаровой мельнице / С. Е. Андреев. – Текст: непосредственный // Горный журнал. – 1980. – № 2. – С. 62-68.

4. Классификационная схема режимов движения сыпучей среды во вращающемся бара-

бане / А. В. Сланевский, И. И. Лабунина, Л. Г. Бернштейн, А. А. Сланевский. – Текст: непосредственный // Цемент. – 1992. – № 3. – С. 70-77.

5. Крум, В. А. Интенсификация процесса сепарации горизонтальным цилиндрическим решетом с авторезонансным режимом движения обрабатываемого зерна: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Крум Василий Андреевич. – Новосибирск, СФНЦА РАН, 2020. – 24 с. – Текст: непосредственный.

6. Патрин, В. А. Влияние вида движения зернового вороха в горизонтальном цилиндрическом решете на интенсивность процесса сепарации / В. А. Патрин, В. А. Крум. – Текст: электронный // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). – 2014. – № 4 (33). – С. 168-173. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23873203>. – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.

7. Сороченко, С. Ф. Обоснование параметров решётно-винтового сепаратора в системе очистки зерноуборочного комбайна: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Сороченко Сергей Федорович. – Барнаул, 1996. – 210 с. – Текст: непосредственный.

### References

1. Patent na poleznuiu model No. 211543 Rossiiskaia Federatsiia, MPK A01F 12/44 (2006.01). Zernoochistitelnaia mashina: No. 2022104107: zaiavl. 16.02.2022: opubl. 14.06.2022 / Ugarov V. A., Sorochenko S. F., Daudov G. Iu.; zaiavitel FGBOU VO «Altaiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet». – 7 s.

2. Ugarov, V. A. Issledovanie dvizheniia zernovogo vorokha v gorizontálnom tsentrobezhno-reshetnom separatore s aktivatorom / V. A. Ugarov, S. F. Sorochenko // Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2023. – No. 6 (224). – S. 90-99. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54052036>.

3. Andreev, S. E. O vnutrennem trenii v sharovoi melnitse / S. E. Andreev // Gornyi zhurnal. – 1980. – No. 2. – S. 62-68.

4. Slanevskii, A. V. Klassifikatsionnaia skhema rezhimov dvizheniia sypuchei sredy vo vrashchaishechensia barabane / A. V. Slanevskii, I. I. Labunina, L. G. Bernshtein, A. A. Slanevskii // Tsement. – 1992. – No. 3. – S. 70-77.

5. Krum, V. A. Intensifikatsiia protsessa separatsii gorizontalnym tsilindricheskim reshetom s avtozonansnym rezhimom dvizheniia obrabatyvaemogo zerna: avto-ref. diss... kand. tekhn. nauk / V. A. Krum. – Novosibirsk, SFNTsA RAN, 2020. – 24 s.

6. Patrin, V. A. Vlianie vida dvizheniia zernovogo vorokha v gorizontalnem tsilindricheskom reshete na intensivnost protsessa separatsii / V. A. Patrin, V. A. Krum // Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet). –

2014. – No. 4 (33). – С. 168-173. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23873203>.

7. Sorochenko, S. F. Obosnovanie parametrov reshetno-vintovogo separatora v sisteme oчитki zernouborochnogo kombaina: diss ... kand. tekhn. nauk / Sorochenko Sergei Fedorovich. – Barnaul, 1996. – 210 s.

*Работа выполнена при поддержке Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК-2021».*



УДК 636.034

DOI: 10.53083/1996-4277-2024-233-3-98-103

С.В. Речкин, А.П. Сырбаков, В.А. Ротова  
S.V. Rechkin, A.P. Syrbakov, V.A. Rotova

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАСТБИЩНОГО ЖИВОТНОВОДСТВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

### MATHEMATICAL MODELING OF PASTURE LIVESTOCK FARMING PROCESS USING DIGITAL TECHNOLOGIES

**Ключевые слова:** цифровые технологии, культурное пастбище, биотехническая система, Марковский процесс, пастбищное животноводство, математическое моделирование.

Цифровизация технологических процессов в сельском хозяйстве является важным аспектом получения высококачественной и конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции. В настоящее время существует потребность в разработке и применении цифровых решений, основанных на математическом моделировании, для оптимизации процессов и принятия информированных решений в области пастбищного животноводства. Применение современных цифровых и информационных процессов в пастбищном животноводстве сопряжено с разработкой и обоснованием функционирования сложной биотехнической системы «Человек (оператор) – машина (устройство) – животное». Было проведено математическое моделирование функционирования системы с использованием случайных Марковских процессов, которые часто применяются в теории массового обслуживания. Предложена графовая модель для изучаемой биотехнической системы, а также система дифференциальных уравнений, которые описывают ее математическую модель. Решение этих уравнений позволяет нам эффективно выявлять проблемные участки функционирования системы в целом и оценивать надежность работы отдельных ее компонентов. Благодаря этому на этапе проектирования технических решений возможно легко устранять или минимизировать эти проблемные моменты, что позволит получать продукцию высокого ка-

чества с минимальными затратами ручного труда и временными издержками. Оценка надежности работы звена «машина» способствует выявлению первоочередных технических проблем, решение которых возможно на этапе проектирования и испытания технического устройства. Моделирование пастбищного животноводства позволяет предсказать показатели продуктивности животных, потребности в кормах, а также оценить влияние изменений в условиях содержания на результативность производства.

**Keywords:** digital technologies, plantation pasture, biotechnical system, Markov process, pasture livestock farming, mathematical modeling.

The digitalization of technological processes in agriculture is an important aspect of obtaining high-quality and competitive agricultural products. Currently, there is a need for the development and application of digital solutions based on mathematical modeling to optimize processes and make informed decisions in the field of pasture livestock farming. The application of modern digital and information processes in pasture livestock farming is associated with the development and justification of the functioning of a complex biotechnical system "human (operator) - machine (device) - animal." In this study, mathematical modeling of the system operation using random Markov processes often used in queuing theory was conducted. A graph model for the studied biotechnical system was proposed as well as a system of differential equations that described its mathematical model. Solving these equations allows to effectively identifying the problem areas of the system op-