

На правах рукописи



Аксенов Игорь Игоревич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РЕШЕТНОГО СТАНА
ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

05.20.01 – Технологии и средства механизации сельского хозяйства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Воронеж – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I» (ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ).

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Афоничев Дмитрий Николаевич

Официальные оппоненты: **Тишанинов Николай Петрович**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве», заведующий лабораторией управления качеством технологических процессов в сельском хозяйстве;
Бутовченко Андрей Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», доцент кафедры «Проектирование и технический сервис транспортно-технологических систем».

Ведущая организация: **Общество с ограниченной ответственностью «Воронежсельмаш».**

Защита состоится 17 февраля 2022 г. в 13 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 220.010.04, созданного на базе ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, учебный корпус агроинженерного факультета (корпус № 3), аудитория 319.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ и на сайте www.vsau.ru («Информация о деятельности диссертационных советов» – «Защиты» – «Д 220.010.04»), а также по ссылке: <http://ds.vsau.ru/?p=9135>.

Автореферат разослан 17 декабря 2021 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета



Баскаков Иван Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение производства зерна является основой устойчивого функционирования всего агропромышленного комплекса и обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации. Получение высококачественного товарного зерна обеспечивает незамедлительная, без промежуточного хранения, послеуборочная обработка поступающего с поля вороха с его разделением на фракции. Для этого используются различные зерноочистительные агрегаты, в частности машины, осуществляющие очистку вороха на плоских решетках. Такие рабочие органы являются в настоящее время наиболее универсальными и широко используются в зерноочистительных комплексах.

Решетные станы зерноочистительных машин совершают возвратно-поступательное движение, что вызывает вибрации, которые оказывают негативные воздействия на узлы и детали машин, опорные строительные конструкции, а также на работников. Следует отметить и высокий уровень шума при работе решетных станов. В результате ухудшаются условия производственной среды, что приводит к снижению эффективности технологического процесса, возникновению заболеваний у работников, преждевременному износу машин, опорных строительных конструкций, и в итоге к дополнительным финансовым, материальным и трудовым затратам на производство продукции.

Для снижения вибрации зерноочистительных машин необходимо изучить кинематические и динамические параметры работы решетного стана, что позволит выявить причины возникновения вибрации и обосновать технические решения по ее снижению.

Поиск технических решений, направленных на снижение вибрации зерноочистительных машин, является актуальной задачей совершенствования указанных машин. В результате снижения вибрации не только улучшаются условия производственной среды, условия труда работников зерноочистительных комплексов, но и повышается эффективность очистки зернового вороха.

Диссертационная работа посвящена обоснованию технического решения по снижению вибрации зерноочистительных машин на основе применения пневмоподушки для установки решетного стана и изучению особенностей работы такого устройства с целью определения рациональных режимов разделения зернового вороха. Таким образом, тема исследования является актуальной.

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы агроинженерного факультета ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ «Инновационные направления совершенствования процессов и технических средств механизации и электрификации сельскохозяйственного производства», которая утверждена ученым советом университета (номер государственной регистрации 01.200.1-003986).

Степень разработанности темы. Вопросами повышения эффективности сепарации зерна на плоских решетках, совершенствования решетных станов зерноочистительных машин занимались и занимаются в настоящее время множество научных организаций и ученых.

Закономерности движения материала по поверхности, совершающей гармонические колебания, были рассмотрены в работах Бушуева Н.М., Гончарова Е.С., Дубровского А.А., Бардышева Г.М., Зайки П.М., Гортинского В.В., Баб-

ченко В.Д., Волошина Н.И., Быкова В.С., Корнева А.С. Технологические процессы разделения зерновой смеси, послеуборочной обработки зерна, а также конструкции и рабочие процессы зерноочистительных машин исследовали и совершенствовали в следующих научных и научно-образовательных организациях: Всероссийский научно-исследовательский институт использования техники и нефтепродуктов в сельском хозяйстве (Тишанинов Н.П., Анашкин А.В.); Донской государственной технической университет (Ермольев Ю.И., Бутовченко А.В., Дорошенко А.А.); Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова (Галкин В.Д., Хандриков В.А.). Значительный вклад в развитие зерноочистительной техники, совершенствование технологических процессов послеуборочной обработки зерна и подготовки семян внесла научная школа профессора Тарасенко А.П., действующая в Воронежском государственном аграрном университете имени императора Петра I. Представители этой школы (Оробинский В.И., Гиевский А.М., Баскаков И.В., Чернышов А.В. и другие) и в настоящее время активно ведут научные исследования в области совершенствования технологических процессов послеуборочной обработки зерна и подготовки семян, зерноочистительных машин. Необходимо также отметить плодотворную работу по совершенствованию и модернизации зерноочистительных машин и комплексов специалистов ООО «Воронежсельмаш». Указанные ученые и специалисты в своих научных работах и опытно-конструкторских разработках подробно описали процесс сепарации зернового материала на плоских решетках, однако, остаются нерешенными отдельные вопросы.

Изучение и анализ литературных и патентных источников показали следующее. Неуравновешенность движущихся частей зерноочистительных машин, недостаточная жесткость элементов рамной конструкции вызывают виброперемещения рам таких машин, в несколько раз превышающие установленные нормативные значения. Колебания рамы зерноочистительной машины увеличивают фактическую амплитуду колебаний ситовых корпусов до 40 % в сравнении с номинальной и существенно снижают качество сепарирования, а также приводят к повышенному износу механизмов. Существующие методики расчета рамных конструкций не учитывают всех особенностей зерноочистительных машин, как машин с преднамеренно возбужденной вибрацией для осуществления технологического процесса. Для повышения надежности зерноочистительных машин и их вибрационной безопасности, улучшения качества сепарирования необходимо снижение вибрационных перемещений несущих конструкций. Улучшение вибрационных характеристик зерноочистительных машин возможно за счет совершенствования устройств подвеса решетчатых станков.

Объектом исследования является рабочий процесс решетчатого станка зерноочистительной машины.

Предмет исследования: закономерности функционирования решетчатых станков зерноочистительных машин.

Цель работы: повышение эффективности функционирования и вибрационной безопасности зерноочистительных машин.

Задачи исследования:

1) определить кинематические параметры колеблющегося решетчатого станка на упругой плоской подвеске;

2) определить силовые параметры рабочего процесса решетного стана зерноочистительной машины в зависимости от угла поворота эксцентрика привода и установить причины возникновения вибрации;

3) выявить закономерности рабочего процесса решетного стана, установленного на пневмоподушке;

4) установить зависимости коэффициента сепарации от показателей режимов работы решетных станов на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке;

5) оценить влияние показателей режимов работы решетных станов на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, на вибрацию и шум зерноочистительных машин.

Научная новизна работы:

1) предложена методика расчета кинематических параметров колеблющегося решетного стана на упругой плоской подвеске, отличающаяся аппроксимацией численных решений уравнений, связывающих перемещения решетного стана с углом поворота эксцентрика привода;

2) получены аналитические зависимости сил, действующих на решетный стан на упругой плоской подвеске, от угла поворота эксцентрика привода, отличающиеся тем, что учитывают ускорения решетного стана, возникающие в результате его колебаний;

3) выявлены закономерности рабочего процесса решетного стана, установленного на пневмоподушку, отличающиеся тем, что учитывают упругость пневмоподушки;

4) экспериментально установлены зависимости коэффициента сепарации от режимов работы решетных станов на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке;

5) экспериментально получены зависимости уровня вибрации и шума зерноочистительных машин от режимов работы решетных станов на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные аналитические зависимости кинематических параметров решетного стана и сил, действующих на решетный стан, от угла поворота эксцентрика привода при различных видах подвески решетного стана позволяют выполнить расчет перемещений, скоростей, ускорений решетного стана и действующих на него сил в течение периода колебания.

Практическую значимость имеют предложенная конструкция решетного стана, установленного на пневмоподушке, обеспечивающая снижение вибрации и шума зерноочистительных машин, повышение эффективности сепарации зернового вороха; табличные и графические зависимости коэффициента сепарации, вибрации и шума от режимов работы решетных станов, позволяющие определить рациональные режимы технологического процесса сепарации зернового вороха.

Методология и методы исследования. Теоретическое исследование произведено на основе методов математического моделирования и классической механики. Лабораторный эксперимент поставлен на основе апробированных методик, для его проведения модернизирована лабораторная установка для исследования процесса сепарации зерна. Измерения проводили сертифициро-

ванными и поверенными приборами. При проведении расчетов и обработке результатов эксперимента использовали современные компьютеры и применяли программное обеспечение: Microsoft Excel, Mathcad, MatLab, Maple, Statistica.

Положения, выносимые на защиту:

1) методика расчета кинематических параметров колеблющегося решетчатого стана на упругой плоской подвеске, позволяющая определить ускорения решетчатого стана при различных углах поворота эксцентрика привода;

2) аналитические зависимости сил, действующих на решетчатый стан на упругой плоской подвеске, от угла поворота эксцентрика привода, позволяющие выявить причины возбуждения вибрации;

3) закономерности рабочего процесса решетчатого стана, установленного на пневмоподушку, позволяющие определить снижения биений решетчатого стана за счет упругости пневмоподушки;

4) зависимости коэффициента сепарации от режимов работы решетчатых станом на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, позволяющие оценить эффективность реализации процесса сепарации зернового вороха решетчатым станом, установленным на пневмоподушке;

5) зависимости уровня вибрации и шума зерноочистительных машин от режимов работы решетчатых станом на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, позволяющие установить допустимые режимы работы решетчатых станом по вибрации и шуму.

Степень достоверности и апробация результатов. Результаты получены с применением современных теоретических подходов, методов математического анализа, теории зерноочистительных машин, математического моделирования, апробированных методик экспериментальных исследований.

Достоверность результатов подтверждается методологической базой исследований, проведением системного анализа решаемых задач и применением методов математического моделирования, использованием современных средств вычислительной техники, поверенных измерительных приборов, результатами внедрения в производство.

Результаты диссертационной работы используются ООО НПКФ «Агротех-Гарант-Березовский» при разработке перспективных технологических линий зерноочистительно-сушильных комплексов, а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева» при подготовке бакалавров по направлению 35.03.06 «Агроинженерия».

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались в период с 2013 года по 2021 год на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, а также на международных, всероссийских и национальных научных конференциях.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели, задач и выборе методов исследований, разработке программы и методики экспериментальных исследований, модернизации лабораторной установки, проведении опытов, выполненных лично автором; получении аналитических зависимостей и проведении расчетов, разработке компьютерных программ, совершенствовании подвески решетчатого стана, обработке результатов эксперимента, выпол-

ненных при участии автора, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. Результаты проведенных исследований опубликованы в 30 научных статьях, в том числе восемь статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций. По результатам диссертационной работы опубликованы два учебных пособия, получены патент Российской Федерации на полезную модель и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, включающих 36 рисунков и 18 таблиц, заключения, списка литературы, включающего 158 наименований, пяти приложений. Объем диссертации – 162 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведена степень ее разработанности, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна, изложены теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, отражены личный вклад соискателя, количество публикаций соискателя по теме диссертации, структура и объем диссертационной работы.

В разделе 1 «Обзор исследований и разработок по совершенствованию зерноочистительных машин» представлен анализ конструкций и рабочих процессов зерноочистительных машин, на основе которого определено влияние колебаний и уравнивающих элементов на работу зерноочистительных машин и установлены пути их совершенствования, выявлены влияние вибрации несущей конструкции машины на протекание технологического процесса и пути ее устранения.

Неуравновешенность движущихся частей зерноочистительных машин, недостаточная жесткость элементов рамной конструкции вызывают виброперемещения рам таких машин, в несколько раз превышающие установленные нормативные значения. Колебания рамы зерноочистительной машины увеличивают фактическую амплитуду колебаний ситовых корпусов до 40 % в сравнении с номинальной и существенно снижают качество сепарирования, а также приводят к повышенному износу механизмов.

Существующие методики расчета рамных конструкций не учитывают всех особенностей зерноочистительных машин, как машин с преднамеренно возбужденной вибрацией для осуществления технологического процесса.

Для повышения надежности зерноочистительных машин и их вибрационной безопасности, улучшения качества сепарирования необходимо снижение вибрационных перемещений несущих конструкций. Улучшение вибрационных характеристик зерноочистительных машин возможно за счет совершенствования устройств подвеса решетных станов.

Для установления на стадии проектирования оптимальных параметров и режимов работы зерноочистительных машин с учетом ограничений по виброхарактеристикам при минимальной массе конструкции требуется разработка комплексной математической модели рабочего процесса таких конструкций.

Сложность задачи заключается в том, что применение различных дополнительных устройств для снижения вибрации, а также повышение жесткости конструкции за счет дополнительных элементов приводит к увеличению массы самой машины.

Выполненный обзор позволил оценить степень разработанности темы и сформулировать цель и задачи исследования.

В разделе 2 «Теоретические исследования вибрационных показателей решетных станов зерноочистительных машин» рассмотрены причины возникновения вибрации зерноочистительных машин, обусловленные колебаниями решетных станов, которые характеризуются кинематическими и силовыми параметрами. Сепарационный решетный стан, подвешенный на двух парах упругих плоских подвесок, совершает колебания за счет поворота эксцентрика радиуса R на угол $\alpha = kt$ (k – угловая скорость вращения, с^{-1} , t – время, с). При этом он совершает поступательное движение по дуге окружности радиуса, равного длине подвесок L . Получены уравнения, связывающие перемещения решетного стана с углом поворота эксцентрика:

$$\begin{aligned} \left(\sqrt{S^2 - (h - R)^2} + R \sin \alpha - x\right)^2 + \left(R \cos \alpha - h - L + \sqrt{L^2 - x^2}\right)^2 &= S^2; \\ \left(\sqrt{S^2 - (h - R)^2} + R \sin \alpha - \sqrt{L^2 - (L - y)^2}\right)^2 + (R \cos \alpha - h - y)^2 &= S^2. \end{aligned} \quad (1)$$

где S – длина шатуна, м; h – расстояние по вертикали от центра эксцентрика до начала системы координат, м; x – горизонтальное перемещение решетного стана, м; y – вертикальное перемещение решетного стана, м.

Аналитическое представление решений данных уравнений очень громоздкое, что в частности затрудняет их дифференцирование для нахождения скоростей и ускорений решетного стана. Решение уравнений осуществлялось численным методом в среде Maple, для чего была написана соответствующая программа. При этом учитывается, что угол поворота эксцентрика является функцией времени. Затем производится полиномиальная аппроксимация численного решения относительно времени. Полученные полиномы $x(t)$ и $y(t)$ при следующих значениях параметров: $L=0,7$ м, $S=0,6$ м, $h=0,065$ м, $R=0,03$ м, $k=35$ с^{-1} легко дифференцируется, что позволяет найти функции скоростей $v_x(t)$, $v_y(t)$ и ускорений $a_x(t)$, $a_y(t)$.

$$\begin{aligned} x(t) = & 1,05t + 1,16t^2 - 216t^3 + 65,3t^4 + 0,228 \cdot 10^5 t^5 - 0,348 \cdot 10^6 t^6 + \\ & + 0,396 \cdot 10^7 t^7 - 0,266 \cdot 10^8 t^8 + 0,918 \cdot 10^8 t^9 - 0,133 \cdot 10^9 t^{10} + \\ & + 0,468 \cdot 10^7 t^{11} + 0,835 \cdot 10^8 t^{12} + 0,687 \cdot 10^8 t^{13}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} y(t) = & -0,558 \cdot 10^{-5} t + 0,79t^2 + 1,73t^3 - 336t^4 + 254t^5 + 0,751 \cdot 10^5 t^6 - \\ & - 0,145 \cdot 10^7 t^7 + 0,258 \cdot 10^8 t^8 - 0,377 \cdot 10^9 t^9 + 0,261 \cdot 10^{10} t^{10} - \\ & - 0,114 \cdot 10^{11} t^{11} + 0,264 \cdot 10^{11} t^{12} - 0,253 \cdot 10^{11} t^{13}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для перехода к функции угла поворота эксцентрика используется зависимость $t = \pi\alpha/180k$. Графики зависимостей величин ускорений $a_x(t)$ и $a_y(t)$ от угла поворота эксцентрика представлены на рисунке 1.

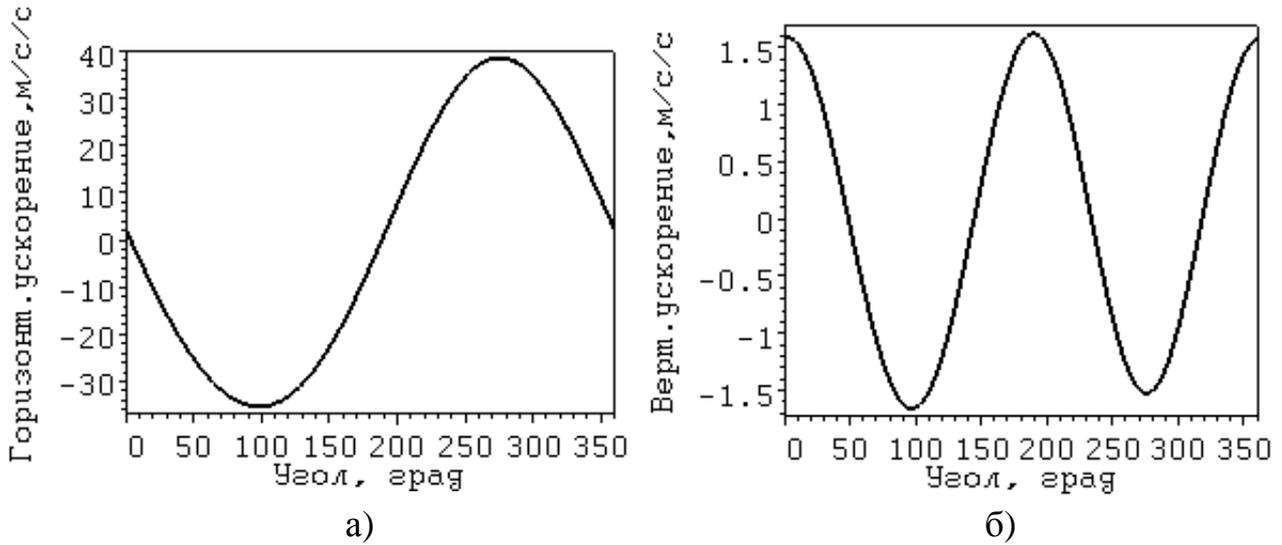


Рисунок 1 – Зависимости величин горизонтальных (а) и вертикальных (б) ускорений решетного стана от угла поворота эксцентрика

Как видно из приведенных графиков (рисунок 1) особенно велики горизонтальные ускорения. Их максимальное и минимальное значения составляют соответственно 38,6 и $-35,3 \text{ м/с}^2$. Очевидно, что они создают большие силы инерции, вызывающие биения решетных станов. В силу того, что линия действия шатуна привода не проходит через центр масс решетного стана, то возникающие при работе моменты вызывают и значительные вертикальные биения. Отметим, что при изменении некоторых геометрических параметров привода эти ускорения значительно изменяются. При изменении S и h максимальное по модулю горизонтальное ускорение практически не меняется. При увеличении h максимальное по модулю вертикальное ускорение увеличивается. Так при $h = 0,065 \text{ м}$ оно равно $1,54 \text{ м/с}^2$, при $h = 0,1 \text{ м}$ оно равно $1,7 \text{ м/с}^2$, а при $h = 0,15 \text{ м}$ оно равно 2 м/с^2 . При уменьшении значения радиуса эксцентрика R максимальное по модулю горизонтальное ускорение уменьшается. Так при $R = 0,03 \text{ м}$ максимальное по модулю горизонтальное ускорение равно $38,6 \text{ м/с}^2$, а при $R = 0,02$ оно равно $25,3 \text{ м/с}^2$. При увеличении угловой скорости вращения эксцентрика k как горизонтальное, так и вертикальное ускорение увеличиваются.

На основе принципа Даламбера записаны уравнения равновесия решетного стана с учетом сил инерции. Получены решения данных уравнений:

$$N_1 = \frac{\left[h_1 (2F_{up} - F_x) + b(G - F_y) \right] \cos \beta \cos \gamma + b(F_{up} - F_x) \sin \beta \cos \gamma}{2b \cos \gamma (\cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma)} + \frac{2h_1 (G - F_y) \cos \beta \sin \gamma - h_1 F_x \sin \beta \sin \gamma}{2b \cos \gamma (\cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma)}; \quad (4)$$

$$N_2 = -\frac{\left[h_1 (2F_{up} - F_x) + b(F_y - G) \right] \cos \beta \cos \gamma + b(F_x - F_{up}) \sin \beta \cos \gamma}{2b \cos \gamma (\cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma)} - \frac{2h_1 (G - F_y) \cos \beta \sin \gamma - h_1 F_x \sin \beta \sin \gamma}{2b \cos \gamma (\cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma)}, \quad (5)$$

где N_1, N_2 – реакции двух пар стержней подвески, Н; $F_{уп}$ – суммарная сила упругости на изгиб четырех стержней, Н; $F_x = ma_x$ и $F_y = ma_y$ – соответственно горизонтальная и вертикальная силы инерции, Н; m – масса решетчатого стана, кг; b – расстояние от стержней до центра масс стана, м; $G = mg$ – вес стана, Н; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – угол наклона шатуна ($\sin \beta = (h + y - R \cos \alpha) / S$); γ – угол отклонения стержня подвески от вертикали ($\sin \gamma = x / L$); h_1 – половина высоты стана, м.

Боковую силу $F_{бок}$ определим по формуле

$$F_{бок} = T \cos \beta = \frac{(F_{уп} \cos \gamma - F_x \cos \gamma - F_y \sin \gamma + G \sin \gamma) \cos \beta}{\cos \beta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma}, \quad (6)$$

где T – сила реакции шатуна, Н.

По причине жесткого закрепления стержней подвески к стану и корпусу установки при их изгибе возникает переменная горизонтальная сила упругости, определяемая по известной формуле

$$F_{уп}(t) = -\frac{3EIx(t)}{L^3}, \quad (7)$$

где E – модуль упругости материала стержня, для стали $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; I – момент инерции сечения стержня, м⁴.

При фиксированной высоте сечения плоских стержней подвески $b = 0,05$ м увеличение ширины сечения a ведет к росту силы упругости, направление которой противоположно боковой силе инерции, что уменьшает суммарную боковую силу, и как следствие горизонтальные и вертикальные силы реакций. В результате проведенных расчетов установлено, что при $a = 0,016$ м боковые силы имеют наименьшее по модулю значение, которое примерно в шесть раз меньше этих сил в случае неупругой подвески. На рисунке 2 представлена зависимость боковой силы от угла поворота эксцентрика при $a = 0,016$ м. Суммарная сила в подвеске $N_1 + N_2$ колеблется от -110 Н до 200 Н, что показывает график, приведенный на рисунке 3.

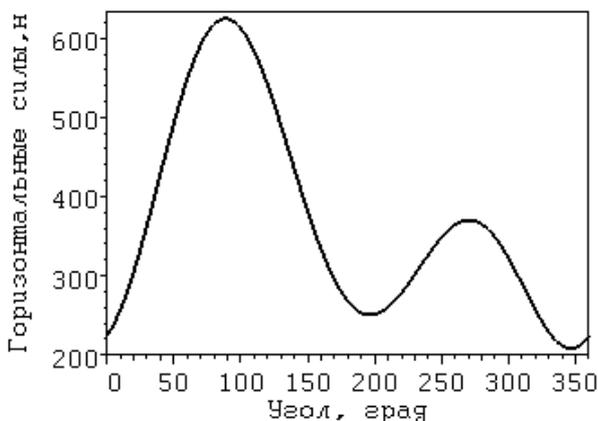


Рисунок 2 – Зависимость боковой силы от угла поворота эксцентрика при $a = 0,016$ м

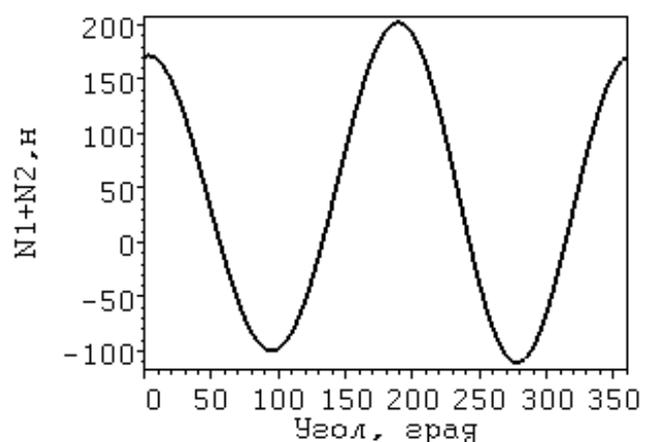


Рисунок 3 – Зависимость суммарной силы реакции в стержнях подвески от угла поворота эксцентрика при $a = 0,016$ м

Таким образом, при правильном выборе геометрии плоских стержней можно значительно снизить как горизонтальные, так и вертикальные биения сепарационных решетных станов.

Предложена конструкция решетного стана, отличающаяся его закреплением на пневмоподушке (патент на полезную модель № 189555). Установка решетного стана на пневмоподушку позволяет гасить вредные вибрации, снижая их воздействие на раму машины, а также уменьшить массу конструкции зерноочистительной машины и упростить процесс регулирования высоты установки решетного стана.

В случае установки решетного стана на пневмоподушке вертикальными перемещениями можно пренебречь. Получена зависимость для определения горизонтального перемещения решетного стана $X(t)$ при его установке на пневмоподушке

$$X(t) = R \sin kt + L - \sqrt{R^2 \sin^2 kt + L^2 - 2HR + 2HR \cos kt}, \quad (8)$$

где L – расстояние по горизонтали от эксцентрика до узла крепления шатуна к стану, м; H – расстояние по вертикали от эксцентрика до узла крепления шатуна к стану, м.

Дифференцирование функции горизонтального перемещения $X(t)$ позволило получить функции скорости и ускорения решетного стана. Расчеты, проведенные в среде Maple при значениях параметров: $H = 0,2$ м, $L = 0,3$ м, $R = 0,025$ м, $k = 30 \text{ с}^{-1}$, позволили построить графики зависимостей скорости и ускорения решетного стана в горизонтальном направлении от угла поворота эксцентрика (рисунки 4 и 5). Максимальная по модулю скорость в этом случае равна $0,87$ м/с, а максимальное по модулю ускорение – $28,8$ м/с².

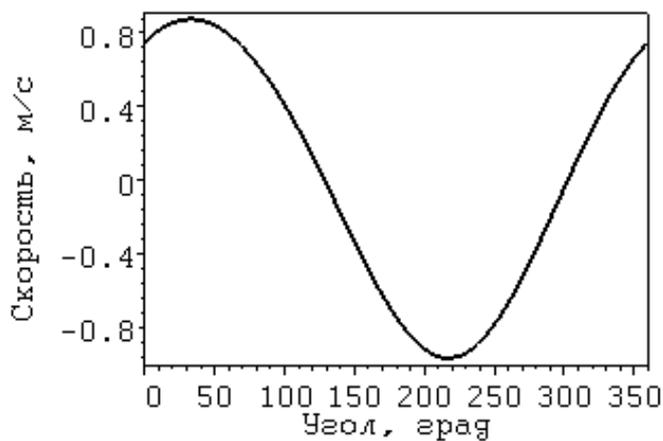


Рисунок 4 – Зависимость скорости решетного стана от угла поворота эксцентрика

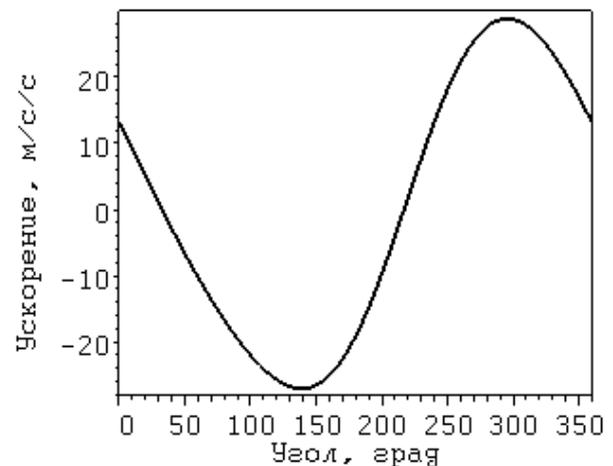


Рисунок 5 – Зависимость ускорения решетного стана от угла поворота эксцентрика

В силу жесткого закрепления пневмоподушки к стану и корпусу машины при ее изгибе возникает переменная горизонтальная сила упругости, определяемая по известной формуле

$$F_{\text{упр}}(t) = -\frac{3EI X(t)}{S^3}, \quad (9)$$

где E – модуль упругости материала пневмоподушки, Па; I – момент инерции пневмоподушки, м^4 ; S – высота пневмоподушки, м.

При изменении давления воздуха в пневмоподушке значения параметров, входящих в формулу (9), могут значительно изменяться в связи с чем, предполагая линейность зависимости силы упругости от горизонтального перемещения, будем определять ее из соотношения

$$F_{\text{упр}}(t) = -KX(t), \quad (10)$$

где K – размерный коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально, Н/м.

Так как функция $X(t)$ установлена – формула (8), то можно получить зависимость, определяющую силу упругости

$$F_{\text{упр}}(t) = -K \left(R \sin kt + L - \sqrt{R^2 \sin^2 kt + L^2 - 2HR + 2HR \cos kt} \right). \quad (11)$$

Горизонтальная сила инерции $F_{\text{ин}}$ определяется по формуле

$$F_{\text{ин}} = mRk^2 \sin kt - \frac{m \left[Rk \sin kt (R \cos kt - H) \right]^2}{\left[R^2 \sin^2 kt + L^2 - 2HR + 2HR \cos kt \right]^{1.5}} + m \frac{R^2 k^2 \cos 2kt - HRk^2 \cos kt}{\sqrt{R^2 \sin^2 kt + L^2 - 2HR + 2HR \cos kt}}. \quad (12)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие силы реакции стана T :

$$T_x = F_{\text{упр}} - F_{\text{ин}}; T_y = (F_{\text{упр}} - F_{\text{ин}}) \text{ctg } \gamma, \quad (13)$$

где γ – угол между вектором силы реакции T (шатуном) и осью ординат.

На рисунке 6 представлены графики зависимостей составляющих силы реакции при указанных ранее геометрических параметрах установки и $K = 4000$ Н/м.

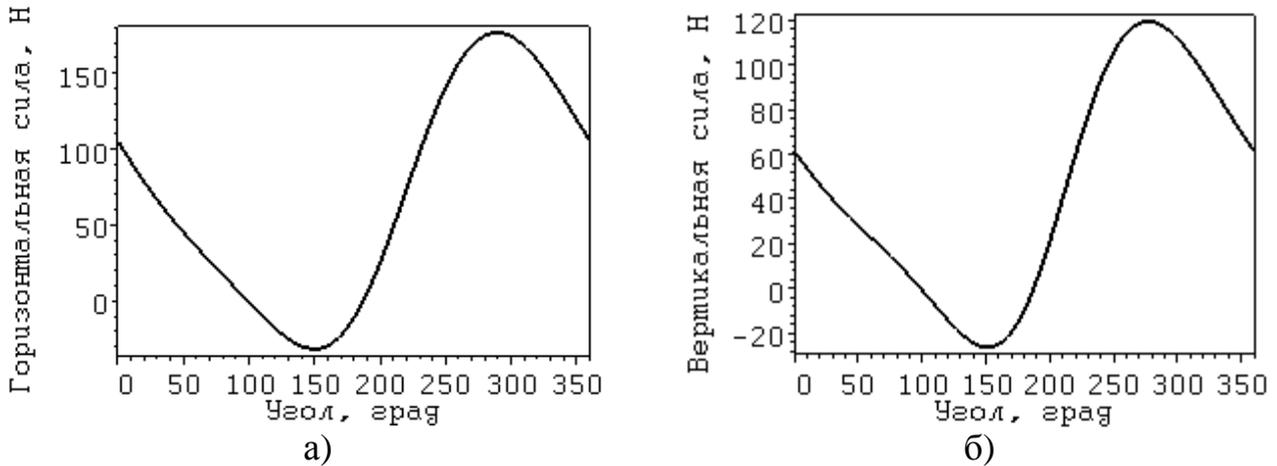


Рисунок 6 – Зависимости горизонтальной (а) и вертикальной (б) составляющих силы реакции решетного стана от угла поворота эксцентрика

При уменьшении величины H , характеризующей вертикальное положение эксцентрика относительно решетного стана, максимальные горизонтальные и вертикальные составляющие силы реакции снижаются. Так при фиксированной величине L , характеризующей горизонтальное положение эксцентрика относительно решетного стана, $L=0,3$ м и $H=0,2$ м: $T_x=175$ Н, $T_y=120$ Н, а при

$H=0$ м: $T_x=92$ Н, $T_y=3,5$ Н, что рекомендует в зависимости от конструктивных возможностей уменьшить параметр H . При увеличении величины L максимальные горизонтальные и вертикальные составляющие силы реакции уменьшаются. Так при фиксированной величине $H=0,2$ м и $L=0,3$ м: $T_x=180$ Н, $T_y=120$ Н, а при $L=0,5$ м: $T_x=135$ Н, $T_y=52$ Н, что рекомендует в зависимости от конструктивных возможностей увеличить параметр L . Отметим, что при $H=0$ значение параметра L практически не влияет на изменение горизонтальных и вертикальных составляющих сил реакции установки. Также следует отметить, что интенсивность биений корпуса установок определяется не величинами реактивных сил, а их изменениями, равными производным от этих сил. На рисунке 7 показаны зависимости горизонтальных и вертикальных биений установки от угла поворота эксцентрика. Уменьшение параметра H значительно уменьшает величины горизонтальных и вертикальных биений установки.

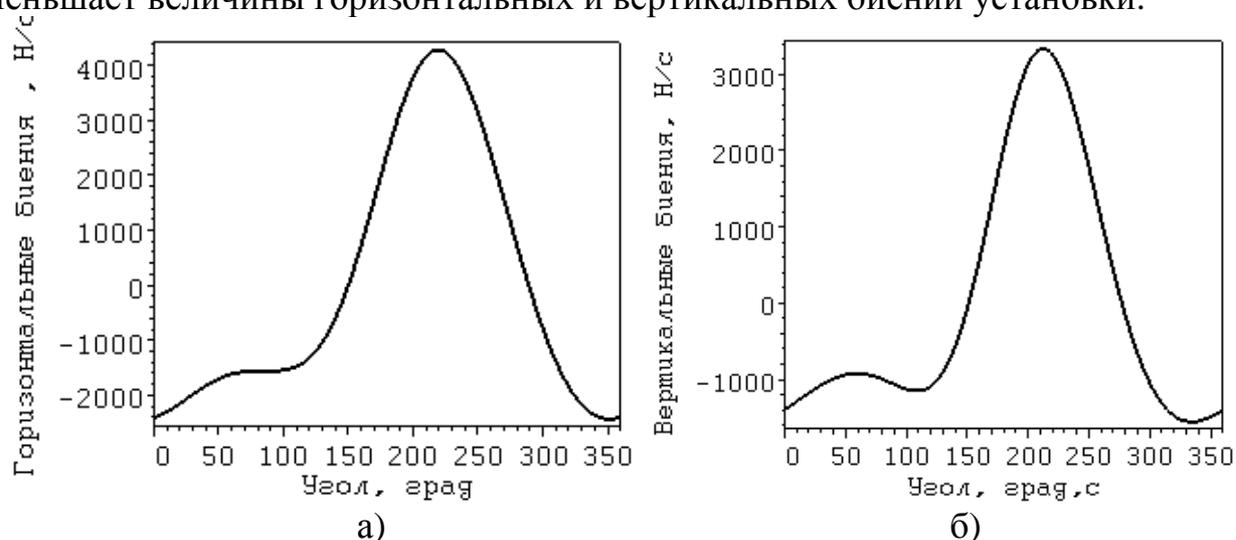


Рисунок 7 – Зависимости величин горизонтальных (а) и вертикальных (б) биений установки от угла поворота эксцентрика

В разделе 3 «Программа и методика экспериментальных исследований» представлены программа экспериментальных исследований, описание экспериментальной установки, методики проведения исследований и обработки результатов.

Программа экспериментальных исследований включала определение: показателей очистки зернового вороха решетными станами на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, для оценки эффективности реализации технологического процесса очистки зернового вороха; вибрации в различных точках несущей рамной конструкции решетных станом на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, при установившемся режиме работы для оценки эффективности гашения вибрации; влияния вида подвески решетного стана на шум зерноочистительной машины; размерного коэффициента пропорциональности K в зависимости (10) для подтверждения линейности зависимости силы упругости от горизонтального перемещения решетного стана, установленного на пневмоподушке.

Исследования проводили в лабораторных условиях на усовершенствованной экспериментальной установке, которая моделирует работу зерноочи-

тельной машины фракционной очистки типа ОЗФ-80. При исследованиях использовали два решетных стана: базовый – решетный стан подвешен на двух парах упругих плоских подвесок; усовершенствованный – решетный стан установлен на пневмоподушке. Экспериментальные исследования выполнены с использованием апробированных методик (ГОСТ 12036-85; ГОСТ 30483-97; ГОСТ 31319 -2006; ГОСТ ISO 9612-2016) и сертифицированных приборов (виброметр AS63B; шумомер «Октава-110А»), а также с применением разработанного устройства вибродиагностики на основе Bluetooth-модуля предназначенного для передачи данных от вибродатчика, оно характеризуется многофункциональностью и помехоустойчивостью. Его отличительной особенностью является использование в качестве принимающего устройства смартфона или планшета на операционной системе Android, для чего была написана специальная программа, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660711.

В разделе 4 «Результаты экспериментальных исследований» представлен состав вороха озимой пшеницы сорта «Московская 39» использованный при проведении исследований; приведены результаты определения влияния вида подвески решетного стана на эффективность очистки зернового вороха, величины подачи зернового вороха на эффективность его очистки; оценки уровня вибрации при различных видах подвески решетного стана и режимах его работы; оценки влияния вида подвески решетного стана и режимов его работы на уровень шума; определения размерного коэффициента пропорциональности, связывающего силу упругости с горизонтальным перемещением решетного стана, закрепленного на пневмоподушке.

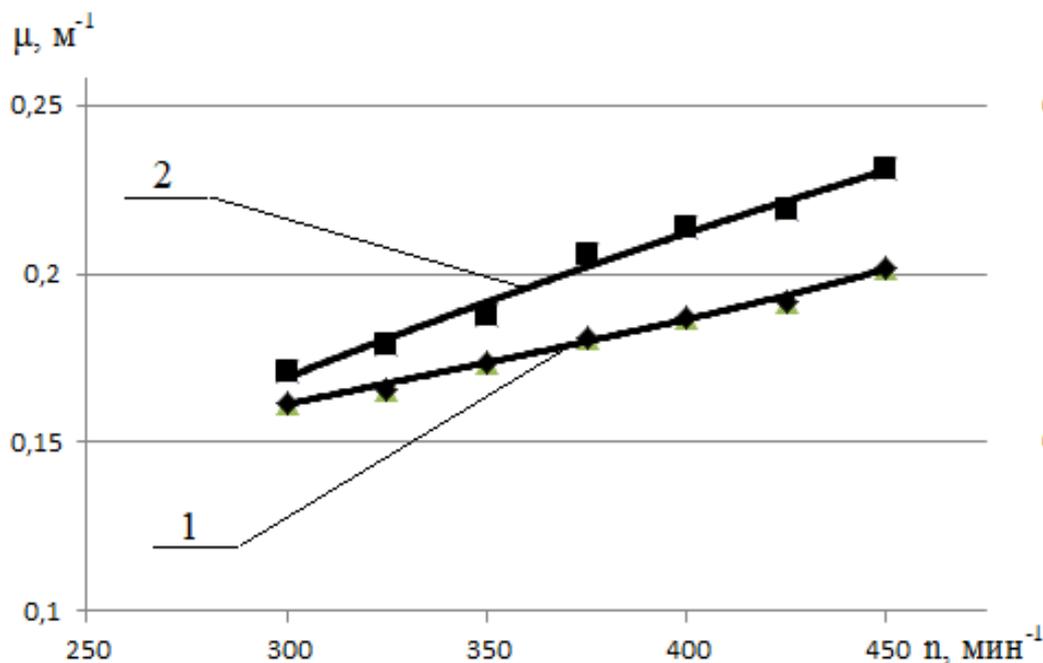
Эффективность работы предлагаемой конструкции решетного стана была проверена опытным путем в лаборатории кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. При проведении опытов определяли массу зерна сошедшего с решета, массу зерна, прошедшего через решето, и выразили через коэффициент сепарации μ . Результаты представлены на рисунке 8.

Экспериментально установлено, что конструкция крепления решетного стана к раме зерноочистительной машины в виде пневмоподушки дает лучшие показатели сепарирования зерновой смеси. С увеличением частоты колебаний решетного стана с 300 мин.⁻¹ до 450 мин.⁻¹ эффективность использования пневмоподушки увеличивается от 3,3 до 17,8 % при амплитуде 16 мм и от 5,5 до 14,3 % при амплитуде 28 мм в сравнении с решетным станом, подвешенным на плоских упругих подвесках. Объяснить такое различие по коэффициенту сепарации можно снижением уровня вредной вибрации за счет гашения колебаний пневмоподушкой.

Для рассмотрения возможности практического внедрения предлагаемой конструкции были проведены опыты по определению степени влияния количества подаваемого зернового вороха на решето при различных режимах работы зерноочистительной машины на эффективность процесса сепарации. Результаты представлены в таблице 1.

Из таблицы 1 видно, что использование предлагаемого варианта крепления решетного стана на пневмоподушке позволяет увеличить эффективность сепарации по сравнению с базовым вариантом при амплитуде 16 мм на 1...10 %

при частоте 350 мин.⁻¹, на 3...18 % при 400 мин.⁻¹ и на 3...20 % при 450 мин.⁻¹. При амплитуде 28 мм увеличение происходит на 0,3...14 % при 350 мин.⁻¹, на 3...19 % при 400 мин.⁻¹ и на 1,6...13 % при 450 мин.⁻¹. Наибольший эффект от использования заявленного технического решения в сравнении с базовым вариантом подвески решетчатого стана наблюдается при высоких частоте и амплитуде колебаний, а также при увеличении подачи зернового вороха на поверхность решета.



1 – базовая схема подвески;

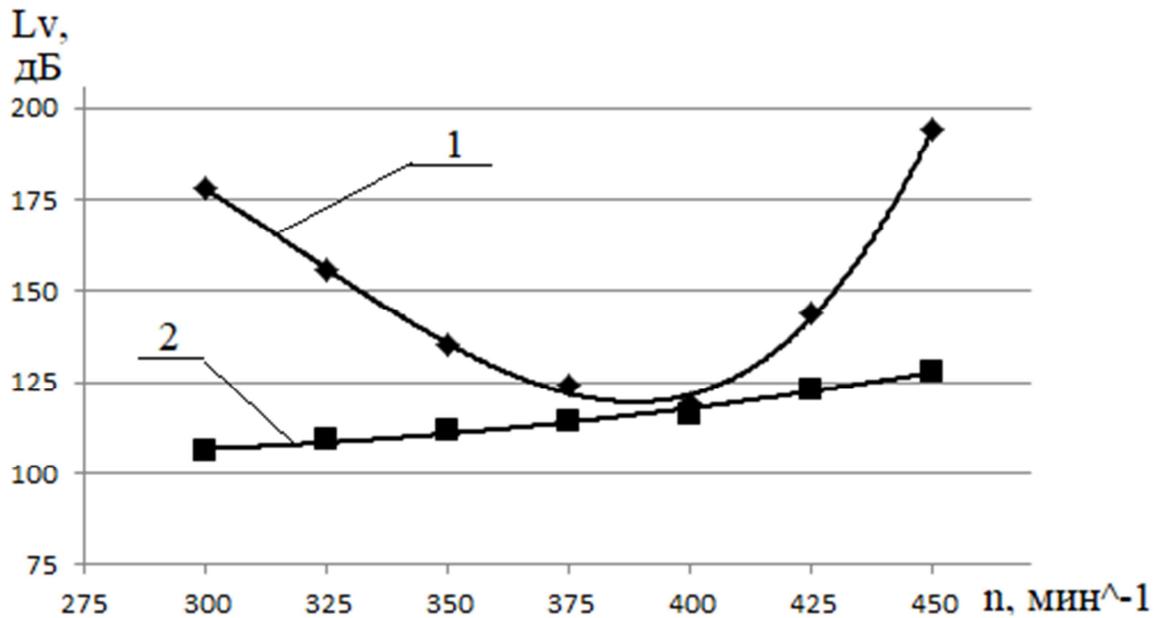
2 – установка решетчатого стана на пневмоподушку

Рисунок 8 – Графики зависимости коэффициента сепарации от частоты привода решетчатого стана (амплитуда колебаний 28 мм)

Таблица 1 – Влияние подачи на процесс сепарации

Частота, мин. ⁻¹	350		400		450	
	16	28	16	28	16	28
Подача, т/ч	Коэффициент сепарации, м. ⁻¹					
Базовый вариант						
7,5	0,185	0,257	0,202	0,264	0,236	0,298
11,7	0,176	0,198	0,201	0,232	0,224	0,266
15	0,168	0,174	0,175	0,187	0,194	0,202
20,7	0,153	0,168	0,167	0,180	0,178	0,199
24,5	0,148	0,157	0,160	0,172	0,163	0,192
30	0,143	0,152	0,154	0,168	0,161	0,186
Предлагаемый вариант						
7,5	0,187	0,258	0,209	0,272	0,244	0,303
11,7	0,184	0,201	0,204	0,241	0,239	0,282
15	0,175	0,188	0,198	0,219	0,211	0,241
20,7	0,171	0,181	0,191	0,209	0,204	0,223
24,5	0,163	0,176	0,188	0,204	0,199	0,218
30	0,158	0,174	0,182	0,200	0,194	0,211

В ходе исследований замеряли вибрацию непосредственно на раме экспериментальной установки. Результаты исследований представлены на рисунке 9.



1 – базовая схема подвески;

2 – установка решетного стана на пневмоподушке

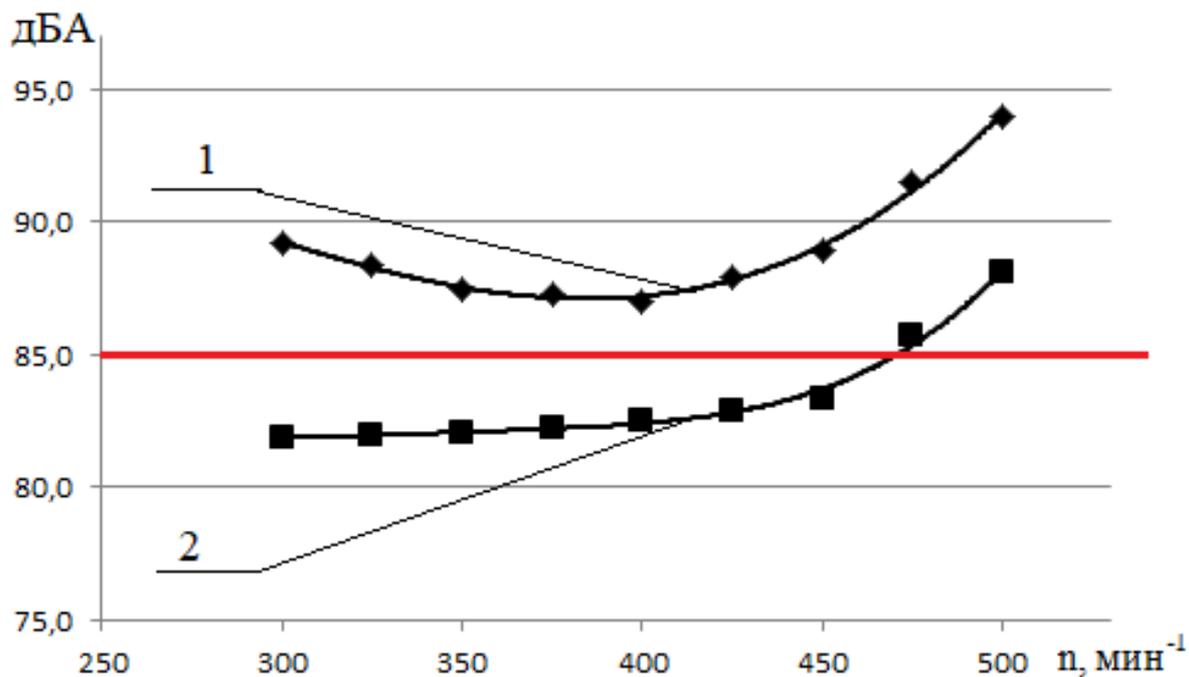
Рисунок 9 – Графики зависимости уровня общей вибрации от частоты колебаний привода решетного стана при различных видах подвески решетного стана (при амплитуде колебаний 28 мм)

Анализ представленных данных (рисунок 9) показывает, что характер изменения уровня вибрации при базовой компоновке решетного стана имеет параболическую зависимость. Это объясняется тем, что при малой частоте колебаний решетного стана (300 мин.⁻¹) люфты в сочленениях решетного стана и в целом по машине, а также знакопеременные нагрузки и значительные инерционные силы от колебаний зернового материала, находящегося на решете и неравномерно распределенного по нему, приводят к возникновению значительных вибраций, при увеличении частоты колебаний решетного стана до 400 мин.⁻¹ происходит самобалансирование (самоуравновешивание) стана и обрабатываемого вороха, при дальнейшем увеличении частоты колебаний происходит разбалансирование системы за счет увеличения интенсивности изменения знакопеременных нагрузок.

При установке решетного стана на пневмоподушке зависимость уровня вибрации от частоты колебаний привода решетного стана прямолинейная. Таким образом, использование предлагаемого технического решения позволяет снизить уровень вибрации на 2,5...44,3 % в зависимости от режимных параметров. Наибольшее расхождение показателей уровня вибрации наблюдаются при частоте в 300 мин.⁻¹ и амплитуде 28 мм – 44,3 %, а наименьшая разница при 400 мин.⁻¹ и амплитуде 16 мм – 2,5 %. Данный факт можно объяснить тем, что решетный стан, установленный на пневмоподушке, не входит в резонансное движение с рамой машины и возникающие знакопеременные нагрузки гасятся за счет упругости воздуха в пневмоподушке.

Эффект в шумовом плане достигается за счет снижения общей вибрации машины. Так как вибрация и шум имеют волновую природу, то сокращение

вибрации неминуемо приведет к снижению и звуковых колебаний. Достоверность этой информации подтверждена в ходе экспериментальных исследований. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 10.



1 – базовая конструкция; 2 – усовершенствованная конструкция

Рисунок 10 – Графики зависимости уровня шума от частоты колебаний решетного стана при амплитуде 28 мм

Из анализа графиков рисунка 10 следует, что только предлагаемая установка решетного стана на пневмоподушке позволяет не превышать предельно допустимый уровень (ПДУ) шума в 85 дБА на всех режимах работы с частотой колебания менее 470 мин.^{-1} . При снижении амплитуды колебаний решетного стана до 16 мм уровень шума на всех частотах снижается.

В разделе 5 «Экономическая оценка эффективности усовершенствования решетного стана зерноочистительной машины» установлены условия труда операторов для базовой и усовершенствованной зерноочистительных машин, они составили соответственно 5 и 1 баллов. В результате размер доплаты для рабочих составляет 12 % от тарифной ставки при работе с базовой машиной, а при работе с усовершенствованной машиной – 4 %. Расчет затрат труда и фонда оплаты труда операторов зерноочистительных машин показывает, что в результате усовершенствования решетного стана обеспечивается экономия фонда оплаты труда в объеме 2 350,08 руб., а в расчете на одну тонну перерабатываемого сырья 0,96 руб., что связано с сокращением выплат за вредные условия труда.

Использование усовершенствованной зерноочистительной машины позволяет получить годовой экономический эффект 816,725 тыс. руб., экономический эффект за срок службы машины (восемь лет) 10 827,526 тыс. руб. при сроке окупаемости капитальных вложений 0,2 лет и коэффициенте эффективности капитальных вложений 0,707, который значительно больше коэффициента, отражающего учетную годовую ставку процента по кредитам банка или вкладу в

банк. Экономический эффект от использования усовершенствованной зерноочистительной машины достигается за счет повышения эффективности сепарации зерна, а также экономии фонда оплаты труда по причине улучшения условий труда операторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Колебания рамы зерноочистительной машины увеличивают фактическую амплитуду колебаний ситовых корпусов до 40 % в сравнении с номинальной и существенно снижают качество сепарирования. Для повышения надежности зерноочистительных машин и их вибрационной безопасности, улучшения качества сепарирования необходимо снижение вибрационных перемещений несущих конструкций. Улучшение вибрационных характеристик зерноочистительных машин возможно за счет совершенствования устройств подвеса решетных станов.

2. Установленные зависимости величин горизонтальных и вертикальных ускорений решетного стана от угла поворота эксцентрика показывают, что особенно велики горизонтальные ускорения. Их максимальное и минимальное значения составляют соответственно 38,6 и $-35,3 \text{ м/с}^2$. Установленные зависимости вертикальных перемещений и ускорений решетного стана от времени показывают, что модуль максимального вертикального ускорения равен $1,54 \text{ м/с}^2$. При увеличении ординаты эксцентрика привода h максимальное по модулю вертикальное ускорение увеличивается. Так при $h = 0,065 \text{ м}$ оно равно $1,54 \text{ м/с}^2$, при $h = 0,1 \text{ м}$ оно равно $1,7 \text{ м/с}^2$, а при $h = 0,15 \text{ м}$ оно равно 2 м/с^2 . При уменьшении значения радиуса эксцентрика R максимальное по модулю горизонтальное ускорение уменьшается. Так при $R = 0,03 \text{ м}$ максимальное по модулю горизонтальное ускорение равно $38,6 \text{ м/с}^2$, а при $R = 0,02$ оно равно $25,3 \text{ м/с}^2$. При увеличении угловой скорости вращения эксцентрика k как горизонтальное, так и вертикальное ускорение увеличиваются. Так при $k = 20 \text{ с}^{-1}$ максимальное по модулю горизонтальное ускорение равно $12,6 \text{ м/с}^2$, а при $k = 30 \text{ с}^{-1}$ оно равно $28,3 \text{ м/с}^2$. Эти ускорения создают большие силы инерции, вызывающие биения решетных станов. Так как линия действия шатуна привода не проходит через центр масс решетного стана, то возникающие моменты вызывают и значительные вертикальные биения.

3. При колебаниях решетного стана боковая сила достигает очень больших значений – более 3500 Н. В свою очередь за счет возникающих моментов, появляются значительные реакции в стержнях подвески, вызывающие вертикальные биения. Суммарная сила в подвеске изменяется от -600 до 400 Н . При фиксированной высоте сечения стержней подвески увеличение ширины сечения ведет к росту силы упругости, направление которой противоположно боковой силе инерции, что уменьшает суммарную боковую силу, и как следствие горизонтальные и вертикальные биения. При ширине сечения $0,016 \text{ м}$ боковые силы имеют наименьшее по модулю максимальное значение, равное 625 Н , которое почти в шесть раз меньше этих сил в случае неупругой подвески. Это отражается на суммарной силе в подвеске, которая колеблется от 100 до 200 Н . Таким образом, при правильном выборе параметров сечения стержней можно значительно снизить как горизонтальные, так и вертикальные биения сепарационных решетных станов.

4. Установка решетного стана на пневмоподушку позволяет гасить вредные вибрации, снижая их воздействие на раму машины, а также уменьшить массу конструкции зерноочистительной машины и упростить процесс регулирования высоты установки решетного стана. Получены аналитические зависимости горизонтальных перемещений, скоростей и ускорений решетного стана, установленного на пневмоподушке, от угла поворота эксцентрика и времени (в установившемся режиме работы). Выполненные по этим зависимостям расчеты показали, что максимальное по модулю ускорение равно $28,8 \text{ м/с}^2$, а максимальная скорость достигает абсолютного значения $0,87 \text{ м/с}$.

5. Анализ сил, действующих на решетный стан, установленный на пневмоподушке, позволил выявить влияние величины H , характеризующей вертикальное положение эксцентрика относительно решетного стана, на максимальные горизонтальные и вертикальные составляющие силы реакции решетного стана T_x и T_y . Так при фиксированной величине L , характеризующей горизонтальное положение эксцентрика относительно решетного стана, $L=0,3 \text{ м}$ и $H=0,2 \text{ м}$: $T_x=175 \text{ Н}$, $T_y=120 \text{ Н}$, а при $H=0 \text{ м}$: $T_x=92 \text{ Н}$, $T_y=3,5 \text{ Н}$, что рекомендует в зависимости от конструктивных возможностей уменьшить параметр H . При увеличении величины L максимальные горизонтальные и вертикальные составляющие силы реакции уменьшаются. Так при фиксированной величине $H=0,2 \text{ м}$ и $L=0,3 \text{ м}$: $T_x=180 \text{ Н}$, $T_y=120 \text{ Н}$, а при $L=0,5 \text{ м}$: $T_x=135 \text{ Н}$, $T_y=52 \text{ Н}$, что рекомендует в зависимости от конструктивных возможностей увеличить параметр L . Отметим, что при $H=0$ значение параметра L практически не влияет на изменение горизонтальных и вертикальных составляющих силы реакции установки. Интенсивность биений корпуса установок определяется не величинами реактивных сил, а их изменениями, равными производным от этих сил. Уменьшение параметра H также значительно уменьшает величины горизонтальных и вертикальных биений установки. Горизонтальные биения снижаются на 25 %, а вертикальные – почти до 0. Сравнение значений сил инерции при работе решетных станом на упругой плоской подвеске, и установленного на пневмоподушке, показало несомненное преимущество последнего вида подвески.

6. Экспериментально доказано, что использование предлагаемого варианта крепления решетного стана на пневмоподушке AIRKRAFT 2В-220 позволяет увеличить коэффициент сепарации по сравнению с базовым вариантом при амплитуде 16 мм на 1...10 % при частоте 350 мин.^{-1} , на 3...18 % при 400 мин.^{-1} и на 3...20 % при 450 мин.^{-1} . При амплитуде 28 мм увеличение происходит на 0,3...14 % при 350 мин.^{-1} , на 3...19 % при 400 мин.^{-1} и на 1,6...13 % при 450 мин.^{-1} . Лучшее разделение зерновой смеси при использовании пневмоподушки происходит за счет сокращения вредных вибраций, что позволяет обеспечить прогнозируемое движение зерновки по решетке.

7. Экспериментально установлено, что использование конструкции решетного стана, установленного на пневмоподушке AIRKRAFT 2В-220, позволяет снизить уровень вибрации на 2,5...44,3 % в зависимости от режимных параметров. Наибольшее расхождение показателей уровня вибрации наблюдаются при частоте в 300 мин.^{-1} и амплитуде 28 мм – 44,3 %, а наименьшая разница при 400 мин.^{-1} и амплитуде 16 мм – 2,5 %. Данный факт можно объяснить тем,

что решетный стан, установленный на пневмоподушке, не входит в резонансное движение с рамой машины и возникающие знакопеременные нагрузки гасятся за счет упругости воздуха в пневмоподушке. Установка решетного стана на пневмоподушке позволит гасить вредные вибрации, снижая их воздействие на раму машины, а также снизить металлоемкость зерноочистительного агрегата и упростить процесс регулирования высоты установки решетного стана. Использование пневмоподушки AIRKRAFT 2B-220 на частотах колебаний решетного стана от 300 до 470 мин.⁻¹ не создает уровень шума свыше ПДУ (85 дБА). Увеличение звуковой нагрузки наблюдается на частотах колебаний решетного стана 475 и 500 мин.⁻¹, и приводит к превышению ПДУ на 0,7...3,1 дБА. При снижении амплитуды колебаний решетного стана до 16 мм уровень шума на всех частотах снижается. Для сохранения здоровья органов слуха персонала на зерноочистительных комплексах целесообразно использовать для подвески решетного стана пневмоподушку на всех режимах работы зерноочистительных машин при частоте колебаний решетного стана до 450 мин.⁻¹.

8. Использование усовершенствованной зерноочистительной машины обеспечит получение годового экономического эффекта 816,725 тыс. руб., экономического эффекта за нормативный срок эксплуатации (восемь лет) – 10 827,526 тыс. руб. при сроке окупаемости капитальных вложений 0,2 лет и коэффициенте эффективности капитальных вложений 0,707. Экономический эффект от использования усовершенствованной зерноочистительной машины достигается за счет повышения эффективности сепарации зерна, а также экономии фонда оплаты труда по причине улучшения условий труда операторов. Предложенное усовершенствование решетного стана зерноочистительной машины обеспечивает получение социального эффекта, выражающегося в снижении вероятности возникновения профессиональных заболеваний операторов из-за вредного воздействия вибрации и шума на рабочем месте.

9. Результаты диссертационной работы внедрены в производство (приложение Г) и используются в учебном процессе (приложение Д). Полученные результаты позволяют рекомендовать применение пневмоподушек, в частности пневмоподушки AIRKRAFT 2B-220, для установки решетных станков зерноочистительных машин с целью снижения вибрации и шума данных машин. Рекомендуется частота колебаний решетного стана 450 мин.⁻¹.

10. Перспективными направлениями дальнейшей разработки темы являются: изучение влияния величины давления в пневмоподушке на уровни вибрации и шума зерноочистительных машин, а также на эффективность сепарации зернового вороха; поиск оптимальных режимов работы решетных станков, установленных на пневмоподушках, обеспечивающих максимальный экономический эффект.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Афоничев Д.Н. Повышение эффективности использования систем технического диагностирования в сельском хозяйстве / Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 4. – С. 109–114.

2. Analysis of the beats of separation sieve pans / V.P. Shatsky, V.I. Orobin-sky, I.I. Axenov, A.S. Kornev // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – 659 (2021). – 012106. doi:10.1088/1755-1315/659/1/012106.

3. Моделирование движения решетчатого стана на пневмоподушке / И.И. Аксенов, В.И. Оробинский, В.П. Шацкий, А.С. Корнев // Вестник Воронежско-го государственного аграрного университета. – 2021. – Т. 14. – № 1(68). – С. 11–17.

4. Аксенов И.И. Анализ уровня общей вибрации при установке решетчатого стана зерноочистительной машины на гофрированный пневмоцилиндр / И.И. Аксенов, В.И. Оробинский, А.С. Корнев // Наука в центральной России. – 2021. – № 3(51). – С. 62–68.

5. Теоретический анализ кинематических параметров решетчатых станом зерноочистительных машин [Электронный ресурс] / Шацкий В.П., Оробинский В.И., Афоничев Д.Н., Аксенов И.И., Корнев А.С. // Resources and Technology. – 2021. – № 2, Т. 18. – С. 18–31. – < URL: <https://rt.petrsu.ru/journal/article.php?id=5703>>.

6. Аксенов И.И. Влияние способа крепления решетчатого стана на эффективность сепарации / И.И. Аксенов, В.И. Оробинский, А.С. Корнев // Наука в Центральной России. – 2021. – № 5(53). – С. 18–23.

7. Аксенов И.И. Влияние величины подачи зернового вороха на эффективность сепарации при использовании гофрированного пневмоцилиндра / И.И. Аксенов, В.И. Оробинский, А.С. Корнев // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2021. – № 3(31). – С. 47–52.

8. Аксенов И.И. Влияние способа крепления решетчатого стана и режимных параметров его работы на уровень шума / И.И. Аксенов, В.И. Оробинский, А.С. Корнев // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – № 2(54). – С. 82–88.

Публикации в материалах конференций, научных журналах и сборниках научных трудов

9. Аксенов И.И. Особенности приборной диагностики технического состояния машин / И.И. Аксенов // Актуальные направления научных исследований XXI века: сб. научн. тр. по матер. междунар. зочн. научно-практич. конф. – 2014. – № 3. – Ч. 3. Междунар. научн.-техн. конф. «I-й Европейский лесопромышленный форум молодежи» / Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж, 2014. – С. 132–137.

10. Аксенов И.И. Особенности вибрационной диагностики технического состояния сельскохозяйственных машин / И.И. Аксенов // Актуальные направления научных исследований XXI века: сб. научн. тр. по матер. междунар. зочн. научно-практич. конф. – 2014. – № 3. – Ч. 4. Междунар. научно-техн. конф. «Эколого-ресурсосберегающие технологии и системы в лесном и сельском хозяйстве» / Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж, 2014. – С. 388–392.

11. Афоничев Д.Н. Ресурсосбережение в сельском хозяйстве путем использования новых средств вибрационной диагностики / Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов // Научно-практические аспекты ресурсосберегающих технологий производства продукции и переработки отходов АПК: межвуз. сб. научн. тр. / ФГБОУ ВПО Воронежский ГАУ. – Воронеж, 2014. – С. 200–204.

12. Афоничев Д.Н. Совершенствование организации технического сервиса

в сельском хозяйстве / Д.Н. Афоничев, Е.В. Кондрашова, И.И. Аксенов // Лесотехнический журнал. – 2014. – № 3. – С. 230–236.

13. Афоничев Д.Н. Ресурсосбережение в сельском хозяйстве на основе использования современных средств вибрационной диагностики машин / Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. научн. тр. по матер. междунар. зочн. научно-практич. конф. – 2014. – № 5. – Ч.3(10–3). Междунар. научно-техн. конф. «Техника и технологии – мост в будущее» / Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж, 2014. – С. 187–191.

14. Афоничев Д.Н. Снижение негативного воздействия машин на окружающую среду / Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: сб. научн. тр. по матер. междунар. зочн. научно-практич. конф. – 2015. – № 4. – Ч.2(15–2). – «I Евразийский конгресс зеленых инноваций «iFOREST» / Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. – Воронеж, 2015. – С. 9–14.

15. Aksenov I.I. Technical diagnostics of agricultural machinery / I.I. Aksenov // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: материалы международной заочной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов на иностранных языках. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – С. 104–107.

16. Анализ влияния конструктивных и режимных параметров работы решетного стана зерноочистительной машины на уровень общей вибрации / А.С. Корнев, В.И. Орбинский, И.И. Аксенов, А.С. Майгуров // Наука вчера, сегодня, завтра: матер. научно-практич. конф. / ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Воронеж, 2016. – С. 23–28.

17. Управление виброн нагруженностью двигателя самоходной машины / Д.Н. Афоничев, И.И. Аксенов, В.В. Остриков, С.Н. Сазонов // Наука вчера, сегодня, завтра: матер. научно-практич. конф. / ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – Воронеж, 2016. – С. 70–76.

18. Аксенов И.И. Совершенствование системы вибродиагностики сельскохозяйственной техники / И.И. Аксенов, С.А. Филонов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: матер. междунар. научно-практич. конф. молодых ученых и специалистов, г. Воронеж, 15–17 ноября 2016 г. В 3-х ч. Ч. 3. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 3–9.

19. Афоничев Д.Н. Контроль технического состояния технологических машин по вибрации / Д.Н. Афоничев, В.В. Василенко, И.И. Аксенов // Современные научно-практические решения XXI века: матер. междунар. научно-практич. конф.; г. Воронеж, 21–22 декабря 2016 г. В 3-х ч. Ч. 2. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – С. 27–32.

20. Aksenov I.I. Determination of negative impact of cars on the environment / I.I. Aksenov, A.V. Vorokhobin // Актуальные проблемы аграрной науки, производства и образования: матер. III-й междунар. заочной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов на иностранных языках, Россия, Воронеж, апрель 2017 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2017. – С. 47–50.

21. Аксенов И.И. Назначение и возможности программы клиента датчика вибрации / И.И. Аксенов, Д.Н. Афоничев // Актуальные направления научных

исследований XXI века: теория и практика. – 2018. – № 5(41). Вторая международная научно-техн. конф. «Современные технологии и автоматизация производства», г. Воронеж, 25–26 октября 2018 г. / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – Воронеж, 2018. – С. 154–159.

22. Исследование воздействия и способов устранения «негативной» вибрации в сельском хозяйстве / И.И. Аксенов, М.Ю. Еремин, М.И. Аксенова, А.И. Аксенов // Инновационные технологии и технические средства для АПК: материалы международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов; Россия, Воронеж, 14–16 ноября 2018 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2018. – С. 472–476.

23. Аксенов И.И. Совершенствование виброизмерений при мониторинге технического состояния машин и сооружений / И.И. Аксенов // Арктика: инновационные технологии, кадры, туризм: матер. междунар. научно-практ. конф., г. Воронеж, 19–21 ноября 2018 г. / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». – Воронеж, 2018. – С. 16–19.

24. Пиляев С.Н. Динамическое моделирование сложных технических систем / С.Н. Пиляев, С.В. Кузьменко, И.И. Аксенов // Наука, образование и инновации в современном мире (НОИ-2019): матер. нац. научной конф. В 2-х ч., г. Воронеж, 17-18 апреля 2019 г.). – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2019. – Ч. I. – С. 223–228.

25. Аксенов И.И. О вертикальных силах инерции решетных станков / И.И. Аксенов, В.П. Шацкий // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 27 марта 2020 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – Ч. II. – С. 295–299.

26. Аксенов И.И. О горизонтальных биениях решетных станков / И.И. Аксенов, В.П. Шацкий // Актуальные направления научных исследований для эффективного развития АПК: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 27 марта 2020 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – Ч. II. – С. 299–304.

27. Мба Эсиданг Кристиан. Горизонтальные силы инерции при работе решетных станков зерноочистительных машин / Мба Эсиданг Кристиан, И.И. Аксенов // Современные технологии и автоматизация производства: материалы I-й национальной научно-технической конференции студентов и молодых ученых; Воронеж, 22 марта 2021 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. – № 1(1). – С. 97–101.

28. Мба Эсиданг Кристиан. Особенности математического моделирования рабочего процесса решетных станков зерноочистительных машин / Мба Эсиданг Кристиан, И.И. Аксенов // Современные технологии и автоматизация производства: материалы I-й национальной научно-технической конференции студентов и молодых ученых; Воронеж, 22 марта 2021 г. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГЛТУ», 2021. – № 1(1). – С. 102–106.

29. Аксенов И.И. Оценка упругости пневмоцилиндра усовершенствованного решетного стана / И.И. Аксенов // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной науч-

но-практической конференции; г. Воронеж, 08–09 июня 2021 года. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – Ч. 1. – С. 117–121.

30. Аксенов И.И. К вопросу о силах инерции решетных станков на упругом основании / И.И. Аксенов, В.П. Шацкий // Энергоэффективность и энергосбережение в современном производстве и обществе: материалы международной научно-практической конференции; г. Воронеж, 08–09 июня 2021 года. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2021. – Ч. 1. – С. 122–127.

Учебные пособия

31. Афоничев Д.Н. Информационные технологии в науке и производстве [Электронный ресурс] / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, И.И. Аксенов. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2015. – 140 с. – <URL: <http://catalog.vsau.ru/elib/books/b107291.pdf>>.

32. Автоматика / Д.Н. Афоничев, С.Н. Пиляев, М.Ю. Еремин, И.И. Аксенов, Р.М. Панов. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2020. – 231 с.

Свидетельство, патент

33. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660711. Программа клиента датчика вибрации / И.И. Аксенов, Д.Н. Афоничев; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I». – Заявл. 07.05.2018, зарегистрировано 28.08.2018.

34. Патент 189555 РФ, МПК В 07 В 1/28 (2006.01). Решетный стан / В.И. Оробинский, А.С. Корнев, И.И. Аксенов; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. – № 2018143170; заявл. 05.12.2018, опубл. 28.05.2019. – Бюл. № 16. – 2 с.

Просим принять участие в работе диссертационного совета Д 220.010.04 или выслать Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями по адресу: 394087, г. Воронеж, ул. Тимирязева, д. 13, и.о. ученого секретаря Баскакову И.В. Телефон 8(473)224-39-39, e-mail: smachin@agroeng.vsau.ru.

Подписано в печать 14.12.2021 г. Формат 60x84¹/₁₆. Бумага кн.-журн.

П.л. 1,0. Гарнитура Таймс. Тираж 100 экз. Заказ №22452.

Типография ФГБОУ ВО ВГАУ 394087, Воронеж, ул. Мичурина, 1.