

4.3.1. ТЕХНОЛОГИИ, МАШИНЫ И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА (ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 629.3

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2025_2_83

EDN: NJMYEJ

**Эффективность использования активного демпфера
в подвеске сиденья тракторно-транспортного агрегата****Олег Иванович Поливаев¹, Дмитрий Борисович Болотов^{2✉},
Аркадий Васильевич Химченко³, Андрей Викторович Ворохобин⁴**^{1, 2, 3, 4} Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I,
Воронеж, Россия² BDB1998@yandex.ru[✉]

Аннотация. Для повышения уровня комфорта оператора тракторно-транспортного агрегата особое внимание уделяется снижению негативного воздействия повышенного уровня вибрации на его рабочем месте. Одним из эффективных способов достижения данной цели является совершенствование конструкции сиденья за счет использования активных демпфирующих элементов. Анализ существующих решений показал, что многие традиционные системы недостаточно эффективны с точки зрения устранения проблем, связанных с повышенной вибрационной нагрузкой. Представлены результаты исследования, проведенного с целью разработки и оценки эффективности предложенной авторами конструкции подвески сиденья, способствующей уменьшению воздействия вибрационной нагруженности на оператора. С помощью комплексного подхода, включающего теоретические и экспериментальные исследования, определяли эффективность нового технического решения. Теоретическая часть заключалась в построении и отладке имитационных моделей подвески сиденья, учитывающих реальные условия эксплуатации тракторно-транспортного агрегата. Объектом экспериментальных исследований являлся тракторно-транспортный агрегат в составе трактора Беларус 1221.2 с прицепом 2ГТТС-6. Во время натурных испытаний выполнялись транспортные операции, имитирующие типичные условия работы в хозяйстве, в частности движение по грунтовому участку пути. Полученные данные были использованы в имитационной модели для выявления реального эффекта от внедрения предлагаемой конструкции подвески сиденья с активным демпфирующим элементом. Проведенные расчеты и эксперименты подтвердили эффективность данной разработки. Установлено, что применение активной подвески позволяет увеличить показатель снижения уровня вибрационного воздействия на рабочем месте оператора примерно на 17% по сравнению с серийной конструкцией. Полученные выводы были учтены специалистами ООО «Брянский Тракторный Завод» при выборе конструктивных параметров сиденья оператора с эффективной виброзащитой.

Ключевые слова: тракторно-транспортный агрегат, подвеска сиденья, оператор, виброн нагруженность, магнитореологическая жидкость, активное демпфирующее устройство

Для цитирования: Поливаев О.И., Болотов Д.Б., Химченко А.В., Ворохобин А.В. Эффективность использования активного демпфера в подвеске сиденья тракторно-транспортного агрегата // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 2(85). С. 83–93. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_2_83-93.

4.3.1. TECHNOLOGIES, MACHINERY AND EQUIPMENT
FOR AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX (ENGINEERING SCIENCES)

Original article

**Assessment feasibility of an active vibration damper
in the seat suspension of a tractor-transport unit****Oleg I. Polivaev¹, Dmitriy B. Bolotov^{2✉},
Arkadiy V. Khimchenko³, Andrey V. Vorokhobin⁴**^{1, 2, 3, 4} Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Voronezh, Russia² BDB1998@yandex.ru[✉]

Abstract. To improve the comfort level of the tractor-transport unit operator, special attention is paid to reducing the negative impact of increased vibration levels at his workplace. One of the effective ways to achieve this goal is to improve the seat design through the use of active damping elements. An analysis of existing solutions has shown that many traditional systems are not effective enough in terms of eliminating problems associated with

increased vibration load. The results of a study conducted in order to develop and evaluate the effectiveness of the seat suspension design proposed by the authors, aimed at reducing the impact of vibration stress on the operator, are presented. An integrated approach, including theoretical and experimental research, was used to determine the effectiveness of a new technical solution. Theoretical part consisted in the building and debugging of simulation models of the seat suspension, taking into account the actual operating conditions of the tractor-transport unit. The object of experimental research was a tractor-transport unit consisting of a Belarus 1221.2 tractor with a 2PTS-6 trailer. During the field tests, transportation operations were performed simulating typical farm working conditions, in particular, natural soil roading. The data obtained were used in a simulation model to identify the real effect of the developing of the proposed seat suspension with an active vibration damping element. The calculations and experiments performed have confirmed the effectiveness of the proposed design. It was found that the use of an active suspension makes it possible to increase the rate of reduction of vibration exposure at the operator's workplace by about 17% compared with the standard design. The findings were taken into account by specialists of Bryansk Tractor Plant when choosing the design parameters of the operator's seat with effective vibration protection.

Keywords: tractor-transport unit, seat suspension, operator, vibration load, magnetorheological fluid, active damping device

For citation: Polivaev O.I., Bolotov D.B., Khimchenko A.V., Vorokhobin A.V. Assessment feasibility of an active damper in the seat suspension of a tractor-transport unit. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2025;18(2):83-93. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2025_2_83-93.

Эффективность сельскохозяйственного производства существенно повышается благодаря улучшению процессов грузоперевозок внутри хозяйств. По сведениям специалистов из различных научно-исследовательских учреждений, а также сотрудников высших учебных заведений России, доля перевозок внутри хозяйств, выполняемых с применением тракторно-транспортных агрегатов, достигает 45%, тогда как в зарубежных хозяйствах наблюдается повышение этого показателя вплоть до 63% [1, 12]. Такие высокие показатели обусловлены неудовлетворительным качеством внутрихозяйственной дорожной инфраструктуры (что особенно заметно в осенний и весенний периоды), в связи с чем сельхозпроизводители вынуждены задействовать тракторную технику высокой проходимости и многофункциональности для выполнения транспортных работ.

Важнейшей тенденцией улучшения характеристик тракторов становится рост мощности двигателей внутреннего сгорания, что приводит к возрастанию рабочих скоростей движения. Однако этот процесс негативно сказывается на операторе мобильного энергетического средства (МЭС) из-за увеличения вибрационной нагрузки, возникающей при движении тракторно-транспортного агрегата (ТТА) по неровностям дорожного покрытия и влияющей на здоровье механизатора. Длительное воздействие повышенного уровня вибрации вызывает снижение работоспособности сотрудников, ухудшение реакции и повышает риск возникновения аварийных ситуаций, особенно при выполнении транспортных работ. Помимо прочего примерно половина работников данной сферы со стажем работы свыше десяти лет подвержены профессиональным заболеваниям, а именно вибрационной болезни [3, 5]. Учитывая вышеизложенное, совершенствование известных конструкций, а также разработка новых является обоснованной необходимостью.

Целью данного исследования является улучшение виброзащитных свойств рабочего места оператора тракторно-транспортного агрегата.

В современных условиях для снижения вибрационного воздействия на операторов ТТА применяют пневматические шины, амортизацию мостов и кабин, а также высокофункциональные подвески сидений. Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что лучшие показатели снижения вибрации обеспечивает система подрессоривания сиденья оператора мобильных энергоустановок [2, 7].

Классификация систем гашения колебаний включает три основных типа устройств: традиционные пассивные, активные, комбинированные (полуактивные) [4, 15], схемы которых представлены на рисунке 1.

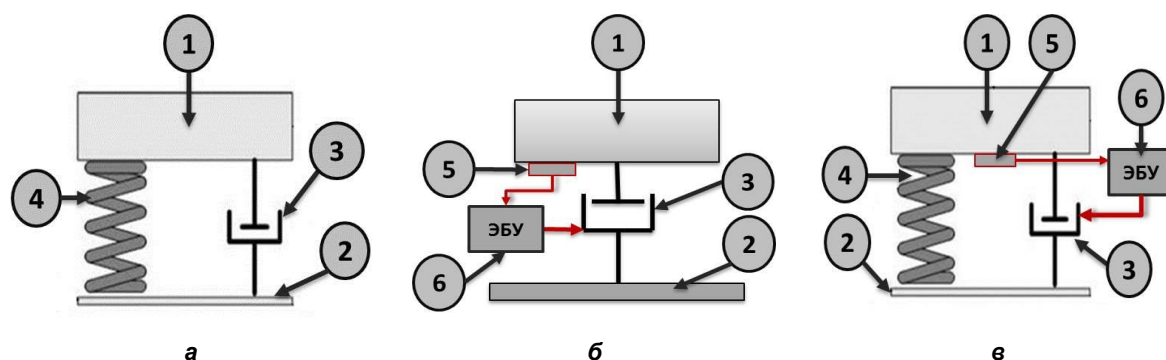


Рис. 1. Схемы систем демпфирования: а – пассивная; б – активная; в – полуактивная;
1 – поддрессоренная масса; 2 – основание; 3 – демпфирующий элемент;
4 – упругий элемент; 5 – датчики; 6 – контроллер

Демпфирующие устройства пассивного типа имеют низкую эффективность работы, так как не могут результативно гасить вибрацию на различных частотах и имеют значительное время срабатывания системы.

Активные устройства демпфирования колебаний сиденья оператора МЭС наиболее эффективны в сравнении с другими системами, однако имеют сложную и дорогостоящую конструкцию, потребляют значительное количество энергии, являются трудно обслуживаемыми, что не позволило им стать широко распространенными решениями в сельскохозяйственной технике.

Устройства полуактивного типа подразумевают использование в конструкции системы поддрессирования классического пассивного амортизатора, который отличается возможностью динамически изменять коэффициент демпфирования. Для этого применяются либо гидравлические элементы, в которых установлен регулирующий дроссель, либо в качестве рабочей жидкости используют магнитореологическую, способную мгновенно изменять свои вязкостные свойства под воздействием электромагнитного поля [13, 14].

В настоящее время устройства поддрессирования полуактивного типа с магнитореологической жидкостью являются наиболее перспективными, это объясняется быстрым временем реакции системы на возмущающие колебания. Сотрудники агроинженерного факультета Воронежского государственного аграрного университета (под научным руководством доктора технических наук, профессора О.И. Поливаева) разработали ряд конструкций подвесок сиденья оператора полуактивного типа.

На рисунке 2 представлена схема подвески сиденья, защищенная патентом на полезную модель РФ 139995 [8]. Принцип работы данной конструкции близок к типичной пассивной системе поддрессирования, где упругие характеристики обеспечивает пружина, а демпфирующие – амортизатор. Отличительная особенность заключается в использовании демпфера с магнитореологической жидкостью в качестве рабочей. Управляющий модуль, обрабатывая данные с различных датчиков, регулирует ток, поступающий на обмотки электромагнита, что динамически изменяет вязкостные свойства рабочей среды, обеспечивая оптимальную компенсацию возникающих вибраций. Тем не менее данная конструкция имеет недостатки: примененная цилиндрическая пружина, имея постоянное значение жесткости, повышает риск возникновения резонанса, а размещение магнитной катушки непосредственно в поршне усложняет конструкцию демпферного узла.

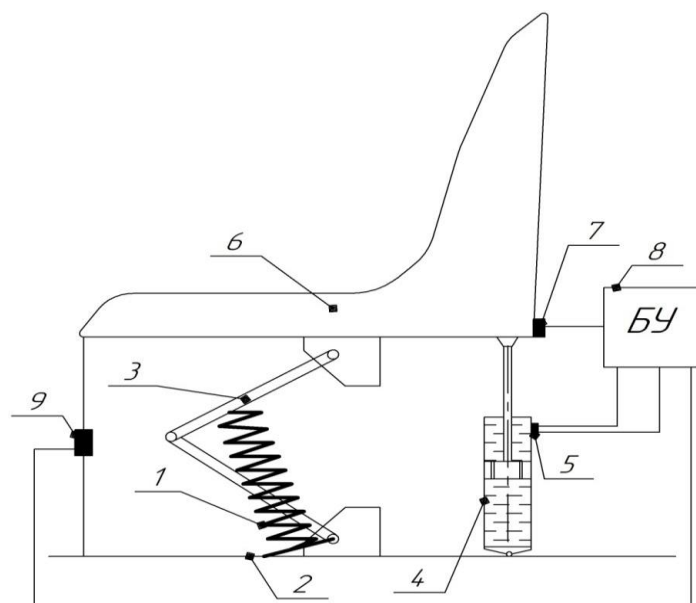


Рис. 2. Схема подвески сиденья, выполненной по патенту на полезную модель 139995:
 1 – цилиндрическая пружина; 2 – основание; 3 – верхняя пара планок;
 4 – гидравлический демпфер; 5 – преобразователь; 6 – основание сиденья;
 7 – датчик вибрации; 8 – контроллер; 9 – датчик положения

На рисунке 3 представлена схема подвески сиденья транспортного средства с активным демпфированием, описанная в патенте на полезную модель 221611 [9].

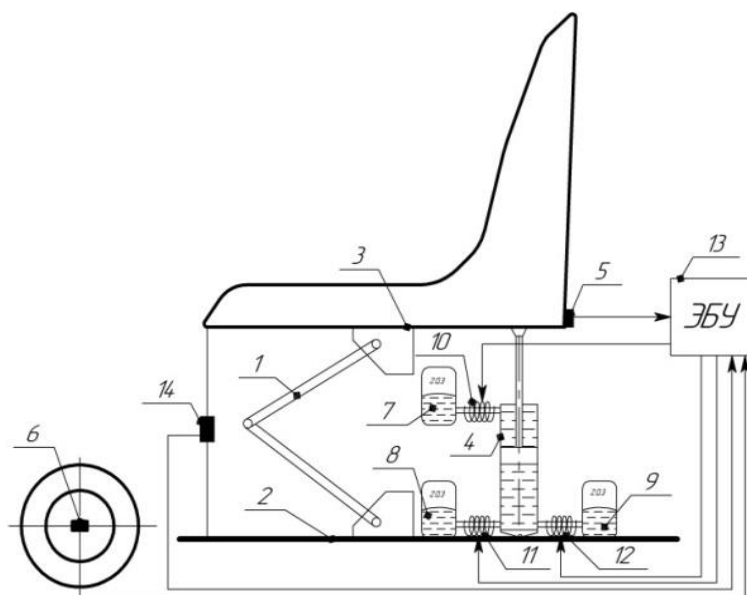


Рис. 3. Схема подвески сиденья, выполненной по патенту на полезную модель 221611:
 1 – пара планок; 2 – основание; 3 – каркас сиденья; 4 – гидравлический демпфер; 5 – датчик ускорений; 6 – датчик виброускорений; 7, 8, 9 – пневмогидравлические аккумуляторы;
 10, 11, 12 – индукционные катушки; 13 – контроллер; 14 – датчик положения

В данной конструкции, в отличие от представленной выше, недостаток, обусловленный наличием цилиндрической пружины, устраняется путем использования нескольких пневмогидравлических аккумуляторов, которые за счет давления в газовой полости реализуют упругие свойства системы поддрессоривания. Электромагнитные катушки установлены не в поршне, как это было в конструкции по патенту 139995, а намагничивают лишь участок трубопровода, соединяющий полость демпфера с пневмогидравлическим

аккумулятором, что позволяет локально в гидромагистрали изменять вязкость жидкости, следовательно, и скорость ее истечения, приводя к изменению демпфирующих характеристик системы подвески сиденья, повышая эффективность работы. Недостаток конструкции заключается в технологической сложности изготовления данной системы подвески из-за использования в конструкции нескольких пневмогидравлических аккумуляторов и электромагнитных катушек, что также увеличивает стоимость системы подвески.

С учетом выявленных недостатков, рассмотренных выше, и других известных конструкций подвесок сиденья оператора мобильного энергосредства была разработана система подрессоривания с активным гасителем колебаний, на которую получен патент на полезную модель РФ 233623 [10]. Схема данной конструкции представлена на рисунке 4.

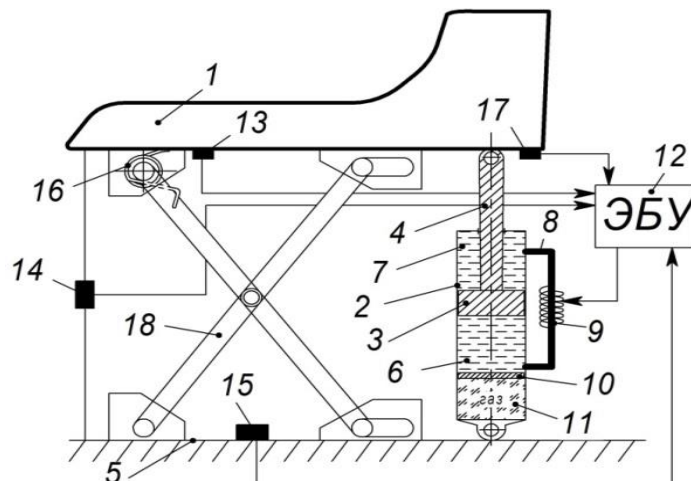


Рис. 4. Схема подвески сиденья, выполненной по патенту на полезную модель 233623:
 1 – каркас сиденья; 2 – гидроцилиндр; 3 – поршень; 4 – шток; 5 – основание подвески сиденья;
 6, 7 – полости гидроцилиндра; 8 – магистраль; 9 – индукционная катушка; 10 – мембрана;
 11 – компенсирующая камера; 12 – электронный блок управления; 13, 14, 15 – датчики
 виброускорений сиденья, перемещения, виброускорений пола кабины; 16 – торсионная
 пружина; 17 – датчик горизонтальных колебаний; 18 – рычаг подвески

Подвеска сиденья транспортного средства состоит из сиденья 1 гидроцилиндра 2 с установленным в нем поршнем 3 со штоком 4. Основание подвески сиденья 5 связано с гидроцилиндром 2, который посредством штока 4 жестко связан с каркасом сиденья 1. Гидроцилиндр 2 имеет две полости – 6 и 7, расположенные по обе стороны поршня 3, при этом полость 7 посредством магистрали 8, проходящей через индукционную катушку 9, соединена с полостью 6. В поршневой полости 6 посредством мембраны 10 отделена компенсирующая камера 11, заполненная газом под давлением. Полости 6 и 7 гидроцилиндра 2 заполнены магнитореологической жидкостью. Индукционная катушка 9 имеет электронное управление, включающее электронный блок управления 12, датчик перемещения сиденья 14, датчик виброускорений пола кабины 15, датчик виброускорений сиденья 13 и датчик горизонтальных колебаний подвески 17. Все датчики жестко установлены на системе подвески сиденья оператора и при помощи кабелей подключены к электронному блоку управления 12. Упругие свойства сиденья определяются торсионной пружиной 16 с рукояткой для настройки начального угла ее закрутки. Пружина жестко связана одним концом с каркасом сиденья 1, а вторым – с рычагом подвески 18.

Устройство работает следующим образом.

В процессе перемещения каркаса сиденья 1 относительно пола кабины 5 происходит перемещение рычагов подвески 18, что приводит к закрутке торсионной пружины 16, которая обеспечивает упругие характеристики системы подрессоривания оператора, при этом магнитореологическая жидкость по магистрали 8, проходящей через индукционную катушку 9, перетекает между полостями 6 и 7 гидроцилиндра 2.

Магнитореологическая жидкость меняет свои свойства (вязкость) под действием электромагнитного поля, создаваемого индукционной катушкой, что приводит к мгновенному изменению ее вязкости. Управляющий сигнал на индукционную катушку 9 поступает с электронного блока управления 12. Разница объемов жидкости в поршневой 6 и штоковой 7 полостях компенсируется за счет воздействия жидкости на мембрану 10, приводя к сжатию газа в пневматической полости 11. Использование торсионной пружины 16, магнитореологической жидкости, индукционной катушки 9, а также газовой камеры 11 под давлением с установленной в ней мембраной 10 обуславливает упругие и демпфирующие свойства предложенной подвески сиденья транспортного средства.

Предварительно перед эксплуатацией транспортного средства однократно осуществляется калибровка блока управления. В процессе калибровки производится оценка передаточной функции системы «подвеска – пол кабины – сиденье оператора». Цифровая оценка данной передаточной функции сохраняется в весовых коэффициентах блока управления. После проведения калибровки можно начинать непосредственную эксплуатацию транспортного средства.

Первоначальное положение сиденья оператора 1 определяется величиной давления газа в камере 11, рассчитанной на среднестатистический вес оператора. При отличии данного значения, более точная настройка осуществляется за счет изменения угла начальной закрутки торсионной пружины 16 при помощи рукоятки. Корректировка положения оператора прекращается при установлении поддрессоренной части подвески сиденья в положении $2/3$ величины хода штока. Настройки первоначального положения сиденья необходимы для обеспечения более эффективной работы подвески сиденья оператора, а также снижения вероятности пробоя подвески.

В процессе движения транспортного средства подвеска сиденья подвергается воздействиям вибрации, возникающей при преодолении неровностей дорожного покрытия. Это воздействие от пневматических шин передается через мост и систему первичного поддрессирования кабины на ее пол, на котором установлен датчик виброускорений 15. Установка данного датчика на полу позволяет с большей точностью определять значения колебаний, которые необходимо погасить, так как подвеска сиденья устанавливается непосредственно на пол кабины. Сигналы с датчика виброускорений 15, а также с датчика перемещения сиденья 14, датчика виброускорений сиденья 13 и датчика горизонтальных перемещений 17, позволяющих отследить колебания подвески, возникающие в результате возрастания амплитуды низкочастотных вертикальных и горизонтальных колебаний остова трактора, поступают в электронный блок управления (ЭБУ) 12, где они обрабатываются согласно заложенному алгоритму, и подбирается оптимальная величина демпфирующих свойств подвески сиденья, а также формируется управляющий сигнал, который воздействует на индукционную катушку 9, что приводит к намагничиванию участка трубопровода, тем самым мгновенно изменяя вязкость магнитореологической жидкости, создавая местное сопротивление в трубопроводе 8. Это позволяет мгновенно изменять демпфирующие свойства подвески сиденья оператора в зависимости от уровня вибронагруженности со стороны пола кабины трактора, за счет чего снижается уровень вертикальных и горизонтальных колебаний, воздействующих на сиденье оператора транспортной машины. За счет этого повышается эффективность гашения вертикальных и горизонтальных колебаний при резком изменении профиля дороги для выполнения всего спектра работ транспортным средством.

Реализация данной конструкции с системой управления, а также проведение комплекса исследований, направленных на определение эффективности предложенной конструкции подвески сиденья оператора МЭС, является трудоемкой задачей как с материальной, так и временной точек зрения. Поэтому было принято решение провести серию испытаний на имитационных моделях, применение которых позволяет повысить точность полученных результатов. В качестве системы автоматизированного моделирования выбор был остановлен на программе Simulink, встроенной в оболочку Matlab,

предназначенной для создания блок-схем и используемой для проектирования систем с многодоменными моделями. Выбор в пользу данных систем проектирования был сделан, так как они представляют собой комплексное решение, позволяющее разрабатывать системные модели и проводить испытания в автоматическом режиме с регистрацией данных и возможностью дальнейшей их обработки и анализа. При этом определение эффективности использования предложенной конструкции системы поддрессирования сиденья оператора будет осуществляться за счет сравнения результатов ее работы с результатами моделирования серийной конструкции.

Общий вид разработанной имитационной модели предложенной конструкции подвески сиденья оператора МЭС по патенту 233623 представлен на рисунке 5, на котором укрупненно показана подмодель демпфирующего устройства активного типа.

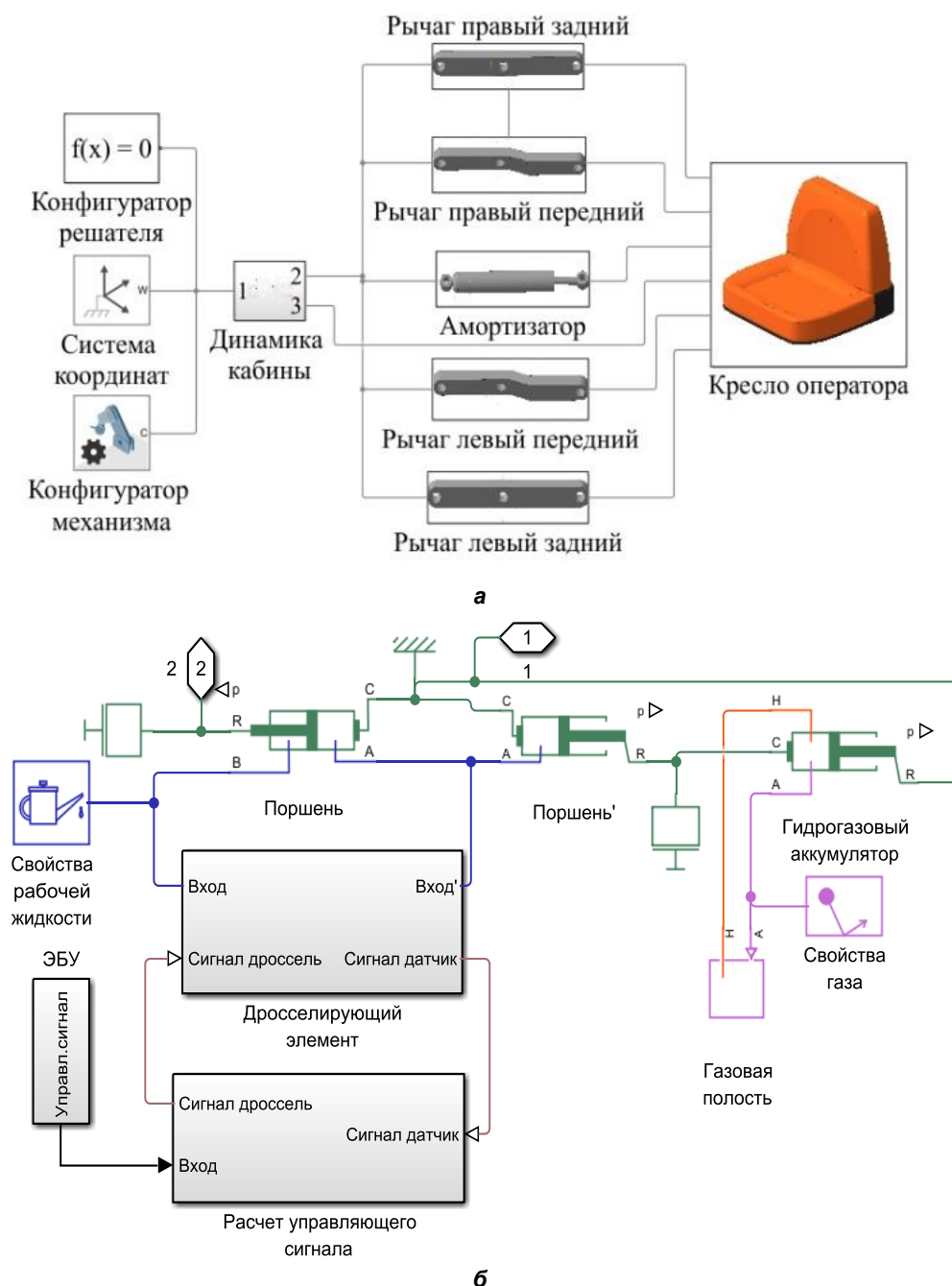


Рис. 5. Имитационная модель кресла оператора трактора Беларус 1221.2:
а – общая модель системы; б – подсистема демпфирующего устройства

Разработанная имитационная модель по всем своим кинематическим параметрам, а также большинству параметров газовых и гидравлических элементов аналогична модели серийной конструкции, адекватность которой была проверена. Отличие предложенной конструкции заключается лишь в использовании в демпфирующем устройстве вместо обратных клапанов дросселирующего элемента. Принцип работы данного элемента заключается в изменении местного сопротивления истечению жидкости. Это обеспечивается за счет использования в качестве рабочей магнитореологической жидкости, способной мгновенно изменять свои вязкостные свойства под воздействием магнитного поля. Для локального намагничивания данной жидкости используется индукционная катушка. При этом моделирование работы воздействия магнитного поля на магнитореологическую жидкость имеет определенные ограничения. Это объясняется тем, что в программном комплексе нельзя динамически изменять вязкость рабочей жидкости. Поэтому была создана дополнительная (суррогатная) модель, позволяющая заменить работу одного элемента другим, замещающим по свойствам исходный. Создание суррогатной модели требует проведения большого количества численных экспериментов, поэтому данный этап разработки математической модели не представлен в данной публикации. При этом оценка качества расчета суррогатной модели осуществлялась с помощью регрессионного анализа, который показал, что уровень значимости ошибки, рассчитанный по критерию Стьюдента, не превышает 0,43%, что свидетельствует о том, что ошибка находится в пределах точности погрешности расчета, позволяя получить точные результаты работы имитационной модели.

Для проведения комплекса численных экспериментов используется дополнительная подсистема, задающая движение пола кабины трактора. Для качественного моделирования подобные данные с высокой степенью достоверности получены в ходе проведения натурного эксперимента, который заключался в определении кинематических параметров нескольких точек силового каркаса мобильного энергетического средства.

Эффективность использования предложенной конструкции сиденья оператора МЭС определялась при работе ТТА на транспортных операциях. Испытания проводились при движении тракторно-транспортного агрегата в составе трактора Беларус 1221.2 с прицепом 2ПТС6 по участку пути на различных скоростях. Скорости движения выбирались согласно диаграмме формируемых скоростей при номинальном режиме работы двигателя с некоторым интервалом, покрывая весь рабочий диапазон скоростей испытываемого трактора. Участок пути, контрольная длина которого составляла 250 м, был выбран с учетом реальных условий работы ТТА.

В результате моделирования работы предложенной конструкции системы поддрессирования сиденья оператора возможна регистрация всех полученных показателей системы подвески (динамические параметры жидкости и газа, кинематические параметры механических элементов и т. д.), что позволяет проводить более глубокий анализ работы. Однако учитывая цель данных исследований, фиксировались только основные кинематические параметры сиденья оператора, которые после обработки представляли собой зависимости ускорения на сиденье от времени. При этом для более корректной сравнительной оценки получаемого эффекта от установки предложенной конструкции подвески сиденья согласно актуальным санитарным требованиям к рабочим местам транспортных средств необходимо провести пересчет полученных данных в частотный (спектральный) вид, согласно известным методикам [11].

Определение эффективности работы предложенной конструкции подвески сиденья оператора ТТА проводилось путем сравнения полученных в результате расчета разработанной модели среднеквадратичных значений (СКЗ) вертикальных ускорений в октавных полосах частот с СКЗ, полученными при расчете серийной конструкции, а также в соответствии с требованиями СанПиН [6]. Виброускорения на сиденье оператора МЭС с серийной системой поддрессирования определялись также в результате расчета имитационной модели.

Сравнительные результаты расчета математических моделей серийной и предложенной конструкций систем поддрессирования оператора ТТА в виде среднеквадратичных значений вертикальных ускорений в октавных полосах частот при движении по грунтовой дороге представлены на рисунке 6.

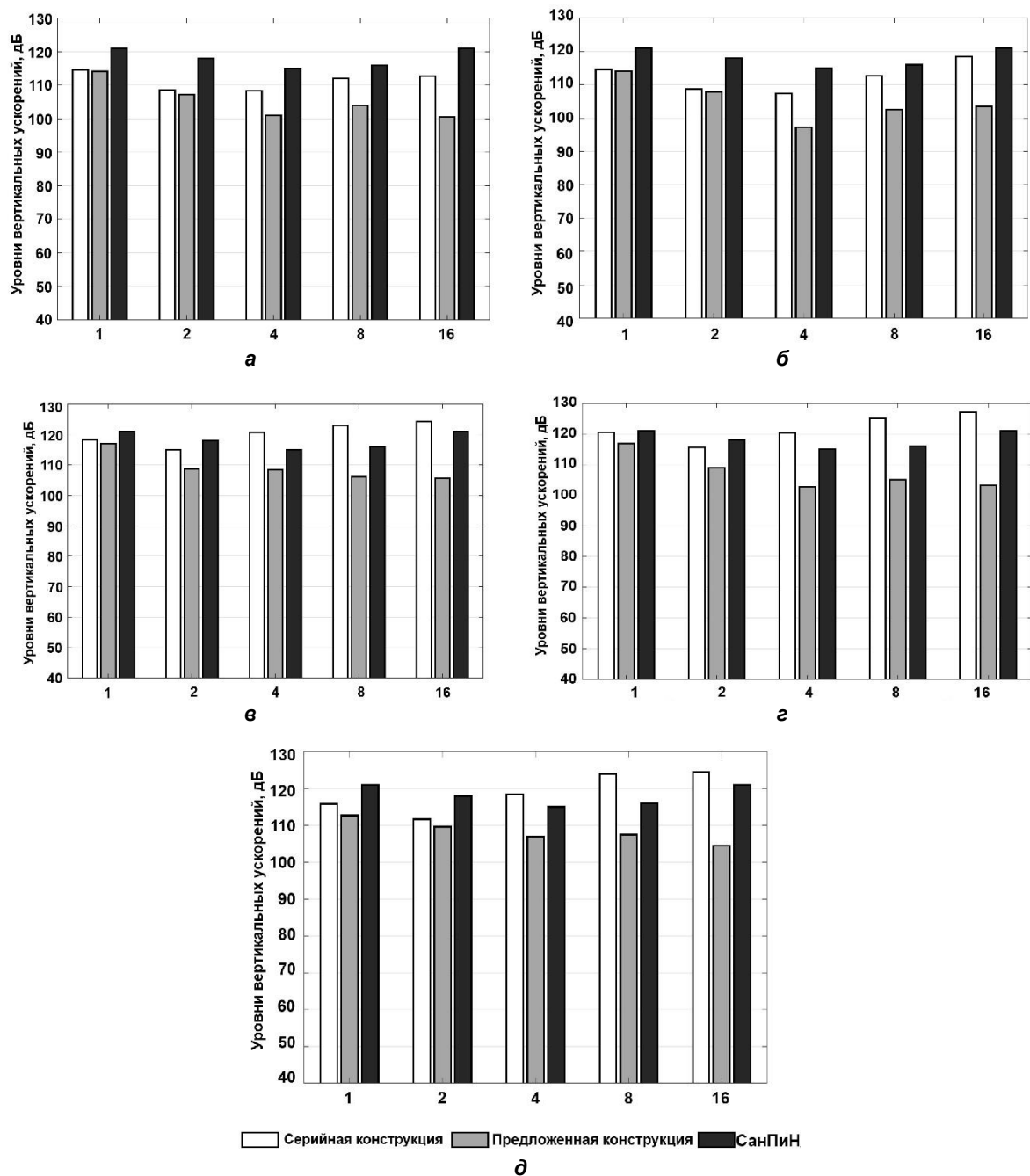


Рис. 6. Среднеквадратичные значения (СКЗ) вертикальных ускорений в октавных полосах частот при движении ТТА с различными скоростями: а – 11,3 км/ч; б – 14,2 км/ч; в – 18,6 км/ч; г – 25,6 км/ч; д – 35 км/ч

Выводы

В результате проведенных численных экспериментов по определению уровня вибронегруженности рабочего места оператора с серийной и предложенными конструкциями сиденья установлено, что показатели серийной подвески при движении ТТА со скоростью свыше 18,6 км/ч в октавах со среднегеометрическими значениями полос частот 4, 8 и 16 Гц не соответствуют требованиям санитарных норм, превышая регламентируемые параметры

соответственно на 5, 6 и 3 дБ. При этом показатели предложенной подвески на всем рассматриваемом диапазоне рабочих скоростей ТТА находятся в пределах, указанных в нормативном документе. Также предложенная конструкция системы поддрессирования сиденья оператора во всем рассматриваемом частотном диапазоне показывает снижение среднеквадратичных значений вертикальных ускорений до 17%. Наибольшая эффективность достигнута при скорости движения ТТА 25,6 км/ч и составила 4, 17, 18, 20 и 24 дБ для октавных полос частот со среднегеометрическими значениями соответственно 1, 2, 4, 8 и 16 Гц.

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований является базой для создания опытного прототипа предложенной конструкции подвески сиденья. Результаты проведенных исследований были приняты ООО «Брянский Тракторный Завод» при выборе конструктивных параметров сиденья оператора с эффективной виброзащитой.

Список источников

1. Аникин Н.В., Бышов Н.В., Успенский И.А. и др. Анализ внутрихозяйственных перевозок сельскохозяйственной продукции // Перспективные направления развития автотранспортного комплекса: материалы II международной научно-производственной конференции (Пенза, 18–20 ноября 2009 г.). Пенза: Изд-во Пензенского государственного аграрного университета, 2009. С. 111–113.
2. Болотов Д.Б., Поливаев О.И. Исследование систем поддрессирования транспортных средств // Наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения для АПК: материалы международной научно-практической конференции (Воронеж, 30 ноября 2023 г.). Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2023. С. 23–28.
3. Елисеев С.В. Структурная теория виброзащитных систем. Новосибирск: Наука, 1978. 222 с.
4. Лощенко А.В. Совершенствование подвески сиденья сельскохозяйственного колесного трактора: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. Воронеж, 2022. 22 с.
5. Мухин Н.А., Косарев В.В., Бабанов С.А. и др. Профессиональные болезни: учебник. Москва: Издательство ГЭОТАР-Медиа, 2016. 336 с.
6. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: Постановление Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека от 28 января 2021 г. № 2 [Электронный ресурс]. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/352056735/?*=ru (дата обращения: 10.02.2025).
7. Пановко Г.Я., Потемкин Б.А., Фролов К.В. Воздействие вибрации и защита человека-оператора от вибрации. Ч. 5 (С. 366–428) // Вибрации в технике: справочник в 6 т.; В.Н. Челомей (пред. ред. совета). Т. 6. Защита от вибрации и ударов; под ред. К.В. Фролова. Москва: Машиностроение, 1981. 455 с.
8. Пат. на полезную модель 139995. Рос. Федерация. Активная подвеска сиденья транспортного средства / Поливаев О.И., Костиков О.М., Миронов Е.С. и др. № 2013152536/11; заявл. 26.11.2013; опубл. 27.04.2014, Бюл. № 12. 4 с.
9. Пат. на полезную модель 221611. Рос. Федерация. Подвеска сиденья транспортного средства с активным демпфированием / Поливаев О.И., Химченко А.В., Болотов Д.Б. и др. № 2023123421; заявл. 09.09.2023; опубл. 14.11.2023, Бюл. № 32. 5 с.
10. Пат. на полезную модель 233623. Рос. Федерация. Подвеска сиденья транспортного средства с активным демпфированием / Поливаев О.И., Химченко А.В., Болотов Д.Б. и др. № 2025101050; заявл. 21.01.2025; опубл. 28.04.2025, Бюл. № 13. 7 с.
11. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы: Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 40 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1751977534&tld=ru> (дата обращения: 10.02.2025).
12. Федоренко В.Ф., Буклагин Д.С., Ерохин М.Н. и др. Технические и технологические требования к перспективной сельскохозяйственной технике: монография. Москва: Росинформмагротех, 2011. 248 с.
13. Sassi S., Cherif K., Thomas M. On the Development of a Smart Damper Based on Electro-Rheological Technology // Smart Materials and Structures. 2003. Vol. 12. Pp. 873–880.
14. Spelta C., Previdi F., Savaresi S.M. et al. Semi-active control of cab suspension in an agricultural tractor via magneto-rheological actuator. Conference Paper // 9th IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2011 (Santiago, December 19–21, 2011). Chile, Santiago. 2011. Pp. 812–817. DOI: 10.1109/ICCA.2011.6138074.
15. Weyenberg T.R., Piolet J.W., Petek N.K. The development of ER fluids for an automotive semi-active suspension system // International Journal of Modern Physics. 1996. Vol. 10. Pp. 3201–3209.

References

1. Anikin N.V., Byshov N.V., Uspensky I.A. et al. Analysis of on-farm transportation of agricultural products. In: Promising Areas of Development of the Motor Transport Complex: Proceedings of the II International Scientific and Industrial Conference (Penza, November 18–20, 2009). Penza: Publishing House of Penza State Agrarian University Publishers; 2009:111–113. (In Russ.).

2. Bolotov D.B., Polivaev O.I. Investigation of vehicle springing systems. In: Science and Education at the Present Stage of Development: Experience, Problems and Solutions for Agriculture: Proceedings of the International Research-to-Practice Conference (Voronezh, November 30, 2023). Voronezh: Voronezh State Agrarian University Publishers; 2023:23-28. (In Russ.).
3. Eliseev S.V. Structural theory of vibration protection systems. Novosibirsk: Nauka Publishers; 1978. 222 p. (In Russ.).
4. Loshchenko A.V. Improving the seat suspension of an agricultural wheeled tractor: Author's Abstract of Candidate Dissertation in Engineering Sciences: 05.20.01. Voronezh; 2022. 22 p. (In Russ.).
5. Mukhin N.A., Kosarev V.V., Babanov S.A. et al. Occupational diseases: textbook. Moscow: GEOTAR-Media Publishing House of Medical Literature; 2016. 336 p. (In Russ.).
6. On approval of sanitary rules and regulations SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: Resolution No. 2 of the Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare of January 28, 2021. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/352056735/?*=ru. (In Russ.).
7. Panovko G.Ya., Potemkin B.A., Frolov K.V. The impact of vibration and the protection of the human operator from vibration. Part 5 (pp. 366-428). In: Vibrations in technology: handbook in 6 volumes; V.N. Chelomey (Editorial Board Chairman). Vol. 6. Protection from vibration and shock; edited by K.V. Frolov. Moscow: Mashinostroenie Publishers; 1981. 455 p. (In Russ.).
8. Utility Model Patent 139995. Russian Federation. Active vehicle seat suspension. Polivaev O.I., Kostikov O.M., Mironov E.S. et al. No. 2013152536/11; claimed 26.11.2013; published 27.04.2014. Bulletin No. 12. 4 p. (In Russ.).
9. Utility Model Patent 221611. Russian Federation. Suspension of a vehicle seat with active damping. Polivaev O.I., Khimchenko A.V., Bolotov D.B. et al. No. 2023123421; claimed 09.09.2023; published 14.11.2023. Bulletin No. 32. 5 p. (In Russ.).
10. Utility Model Patent 233623. Russian Federation. Suspension of a vehicle seat with active damping. Polivaev O.I., Khimchenko A.V., Bolotov D.B. et al. No. 2025101050; claimed 21.01.2025; published 28.04.2025. Bulletin No. 13. 7 p. (In Russ.).
11. CH 2.2.4/2.1.8.566-96. The sanitary norms of industrial vibration, vibration of residential and public buildings: Resolution No. 40 of the State Sanitary and Epidemiological Supervision of Russia of October 31, 1996. URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1751977534&tld=ru>. (In Russ.).
12. Fedorenko V.F., Buklagin D.S., Erokhin M.N. et al. Technical and technological requirements for advanced agricultural machinery: monograph. Moscow: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Research on Engineering and Technical Support of Agro-Industrial Complex Publishers; 2011. 248 p. (In Russ.).
13. Sassi S., Cherif K., Thomas M. On the Development of a Smart Damper Based on Electro-Rheological Technology. *Smart Materials and Structures*. 2003;12:873-880.
14. Spelta C., Previdi F., Savaresi S.M. et al. Semi-active control of cab suspension in an agricultural tractor via magneto-rheological actuator. Conference Paper. In: 9th IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2011 (Santiago, December 19-21, 2011). Chile, Santiago; 2011:812-817. DOI: 10.1109/ICCA.2011.6138074.
15. Weyenberg T.R., Piale J.W., Petek N.K. The development of ER fluids for an automotive semi-active suspension system. *International Journal of Modern Physics*. 1996;10:3201-3209.

Информация об авторах

О.И. Поливаев – доктор технических наук, профессор кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», polivaevoi@icloud.com.

Д.Б. Болотов – аспирант кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей агроинженерного факультета ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», BDB 1998@ya.ru.

А.В. Химченко – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», himch.arkady@yandex.ru.

А.В. Ворохобин – кандидат технических наук, доцент кафедры сельскохозяйственных машин, тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», dogruzka@rambler.ru.

Information about the authors

O.I. Polivaev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Peter the Great, polivaevoi@icloud.com.

D.B. Bolotov, Postgraduate Student, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, BDB 1998@ya.ru.

A.V. Khimchenko, Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, himch.arkady@yandex.ru.

A.V. Vorokhobin Candidate of Engineering Sciences, Docent, the Dept. of Agricultural Machinery, Tractors and Cars, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, dogruzka@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 10.05.2025; одобрена после рецензирования 15.06.2025; принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 10.05.2025; approved after reviewing 15.06.2025; accepted for publication 20.06.2025.

© Поливаев О.И., Болотов Д.Б., Химченко А.В., Ворохобин А.В., 2025