

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР / ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ /  
TECHNICAL SCIENCES

DOI 10.54596/2958-0048-2026-2-246-252

УДК 631.348.45:62-52

МРНТИ 68.85.85

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К РАСЧЕТУ СИСТЕМ СТАБИЛИЗАЦИИ  
ШТАНГ ШИРОКОЗАХВАТНЫХ ОПРЫСКИВАТЕЛЕЙ

Симонов А.Ю.<sup>1\*</sup>, Жумекенова З.Ж.<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>НАО «Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева»,  
Петропавловск, Казахстан

\*Автор для корреспонденции: [andrey85dj@mail.ru](mailto:andrey85dj@mail.ru)

Аннотация

В статье рассматривается проблема совершенствования конструкции штанги полевого опрыскивателя, изготавливаемого на ТОО «AVAGRO» для повышения конкурентоспособности сельхозтехники. Обосновывается необходимость перехода от эмпирического проектирования к методам цифрового моделирования для обеспечения надежности и снижения металлоемкости изделий. Проведен анализ существующих типов систем стабилизации штанг (маятниковых, трапециевидных, активных), выявлены их недостатки и достоинства при работе на высоких скоростях и сложном рельефе.

Основное содержание работы посвящено предложению рациональной схемы расчетов на прочность, основанной на методе конечных элементов, для динамического расчета штанги опрыскивателя. Представлена последовательность построения конечно-элементной модели в специализированных программных комплексах. Результаты исследования подтверждают, что внедрение разработанного метода конечно-элементного анализа на этапе проектирования способствует снижению усталостных разрушений металла и уменьшению металлоемкости конструкции на 15–20% без потери прочностных характеристик.

**Ключевые слова:** опрыскиватель, метод конечных элементов, сельскохозяйственная техника, граничные условия.

КЕҢ ҰСТАҒЫШ БҮРІККІШТЕРДЕГІ ТҰРАҚТАНДЫРУ ЖҮЙЕЛЕРІН  
ЕСЕПТЕУДІҢ ЗАМАНАУИ ТӘСІЛДЕРІ

Симонов А.Ю.<sup>1\*</sup>, Жумекенова З.Ж.<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>«Манаш Қозыбаев атындағы Солтүстік Қазақстан университеті» КеАҚ,  
Петропавл, Қазақстан

\*Хат-хабар үшін автор: [andrey85dj@mail.ru](mailto:andrey85dj@mail.ru)

Аңдатпа

Мақалада ауыл шаруашылығы техникасының бәсекеге қабілеттілігін арттыру үшін "AVAGRO" ЖШС дайындайтын далалық бүріккіш штанганың конструкциясын жетілдіру мәселесі қарастырылады. Өнімдердің сенімділігін қамтамасыз ету және металл сыйымдылығын төмендету үшін эмпирикалық жобалаудан цифрлық модельдеу әдістеріне көшу қажеттілігі негізделді. Штангаларды тұрақтандыру жүйелерінің қолданыстағы түрлеріне талдау жүргізілді (маятник, трапеция, белсенді), олардың жоғары жылдамдықта және күрделі рельефте жұмыс істеудегі кемшіліктері мен артықшылықтары анықталды. Жұмыстың негізгі мазмұны бүріккіш штанганы динамикалық есептеу үшін ақырлы элементтер әдісіне негізделген беріктікті есептеудің ұтымды схемасын ұсынуға арналған. Арнайы бағдарламалық жасақтама кешендерінде ақырлы элемент моделін құру дәйектілігі ұсынылған. Зерттеу нәтижелері жобалау кезеңінде

ақырлы-элементтік талдаудың әзірленген әдісін енгізу металдың шаршау бұзылуын азайтуға және беріктік сипаттамаларын жоғалтпай құрылымның материал сыйымдылығын 15-20%-ға төмендетуге ықпал ететіндігін растайды.

**Кілт сөздер:** бүріккіш, соңғы элементтер әдісі, ауылшаруашылық техникасы, шекаралық шарттар.

## MODERN APPROACHES FOR CALCULATING ROD STABILIZATION SYSTEMS FOR WIDE-AREA SPRAYERS

Simonov A.<sup>1\*</sup>, Zhumekenova Z.<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan

\*Corresponding author: [andrey85dj@mail.ru](mailto:andrey85dj@mail.ru)

### Abstract

This article examines the need to improve the design of a field sprayer boom manufactured by AVAGRO LLC to enhance the competitiveness of agricultural machinery. It substantiates the need to transition from empirical design to digital modeling methods to ensure reliability and reduce metal consumption. An analysis of existing boom stabilization systems (pendulum, trapezoidal, and active) is conducted, identifying their advantages and disadvantages when operating at high speeds and in challenging terrain.

The main focus of the paper is on proposing a rational strength calculation scheme based on the finite element method for dynamic analysis of a sprayer boom. A procedure for constructing a finite element model in specialized software packages is presented. The results of the study confirm that implementing the developed finite element analysis method at the design stage helps reduce metal fatigue failure and decrease the material consumption of the structure by 15–20% without compromising strength characteristics.

**Keywords:** sprayer, finite element method, agricultural machinery, boundary conditions.

### Введение

В настоящее время развитие современного сельского хозяйства неразрывно связано с повышением точности и эффективности технологических операций по внесению удобрений и средств защиты растений. В результате возникает необходимость в увеличении производительности техники для выполнения таких задач. Адаптация и реализация новых технических решений для дополнительных устройств при неизменной составляющей сельхозтехники приводит к созданию более производительных элементов. В качестве объекта исследования рассматривается широкозахватный опрыскиватель производства ТОО «AVAGRO» (Северо-Казахстанская область), общий вид которого представлен на рисунке 1. Данная машина предназначена для обработки значительных площадей сельскохозяйственных угодий за один проход и характеризуется высокой производительностью. Вместе с тем увеличение ширины захвата приводит к возникновению динамических колебаний штанги под воздействием неровностей рельефа и внешних факторов, что обуславливает необходимость разработки и совершенствования систем ее стабилизации.

При модернизации и увеличении ширины захвата изготавливаемых на предприятии опрыскивателей, например, с 24 до 36 метров и более, резко возрастает влияние динамических колебаний штанги на равномерность распределения препарата. В результате, незначительное отклонение основной несущей штанги в вертикальной или горизонтальной плоскости ведет к возникновению проблемы равномерного распыления и «ожогов» растений, а также появлению необработанных зон, что может повлечь за

собой снижение урожайности и нанести экономический ущерб фермерскому хозяйству [1].



Рисунок 1. Опрыскиватель полевой, используемый в условиях ТОО «AVAGRO»

Для современных отечественных предприятий, подобных ТОО «AVAGRO», вопрос импортозамещения и создания конкурентоспособной техники требует перехода от эмпирических методов проектирования к высокоточному цифровому моделированию с решением задач расчета прочности и обеспечения надежности машин и конструкций [2]. Самая главная проблема модернизации конструкции опрыскивателя заключается в следующем: штанга, являясь сложной пространственно-динамической системой, подвержена случайным возмущениям со стороны рельефа поля и кинематики трактора, которую не способны гасить амортизирующие системы. Исходя из проблемы определяется основная задача: внедрение современных методов численного моделирования динамического расчёта систем стабилизации штанг, основанных на использовании конечно-элементного анализа, решения вопросов динамики и имитационного моделирования, позволяющих прогнозировать напряжённо-деформированное состояние конструкции, оценивать устойчивость к случайным возмущениям и обеспечивать требуемые показатели прочности, надёжности и эксплуатационной эффективности широкозахватных опрыскивателей.

#### **Материалы и методы исследования**

Для решения задачи уменьшения вибраций/колебаний в устройстве опрыскивателя предусмотрена система стабилизации штанги, которая предназначена для гашения колебаний и поддержания параллельности штанги относительно поверхности почвы. Анализ показал, что в настоящее время в мировой инженерной практике выделяют несколько основных типов подвесок:

1. Маятниковые подвески – обеспечивают самовыравнивание под действием гравитации, но склонны к раскачиванию при резких поворотах.
2. Трапециевидные механизмы – позволяют лучше контролировать положение штанги на склонах, но требуют сложной системы демпфирования.
3. Комбинированные и активные системы – используют гидравлические или электротехнические приводы с ультразвуковыми датчиками.

Анализ изготавливаемых конструкций, применяемых на базе предприятия «AVAGRO», показывает современный подход к облегчению ферменной конструкции при сохранении жесткости (замена сложных агрегатов более простыми, облегчение конструкции и замена марок материала).

При увеличении скорости движения опрыскивателя стандартные узлы и сочленения становятся концентраторами напряжений, что неизбежно приводит к усталостному разрушению металлоконструкций. Как результат назревает вопрос учета динамических нагрузок на этапе эскизного проектирования [3].

Исторически расчет штанг проводился традиционными методами теоретической механики с использованием упрощенных балочных моделей. Однако такие модели не учитывают сложную геометрию, переменную массу жидкости в магистралях и свойства демпферных узлов. Что на современном этапе развития неизбежно приводит к решению задачи методом конечных элементов. Данный метод является наиболее универсальным, точным и проверенным инструментом для решения подобных задач. Исследования таких авторов, как Кьюри, Лангнакен и отечественных ученых, например, в работах **Научно-производственного центра агроинженерии** приводится статистика, что использование метода конечных элементов при проектировании сокращает металлоемкость на 15–20% без потерь прочности всей конструкции [4]. Математический аппарат метода базируется на фундаментальных принципах дискретизации сплошной среды, подробно описанных в классических трудах по вычислительной механике [5].

Основным расчетным уравнением в матричной форме при применении метода конечных элементов является использование формулы (1):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

где  $[M]$ ,  $[C]$ ,  $[K]$  — матрицы массы, демпфирования и жесткости соответственно;  $\{F(t)\}$  – вектор внешней динамической нагрузки.

Использование программных комплексов (SolidEdgeSimulation, ANSYS, или Femap) позволяет ТОО «AVAGRO» проводить следующие виды расчетов на прочность: статический, модальный и динамический анализ.

Для расчета конструкции опрыскивателя на прочность и для достижения точности моделирования динамических нагрузок штанги на базе чертежей ТОО «AVAGRO» была разработана расчетная модель, последовательность построения которой разделена на несколько этапов:

1. идеализация геометрии и создание сетки. На данном этапе трехмерная CAD-модель штанги упрощается для исключения второстепенных элементов (крепеж, декоративные элементы), не влияющих на общую жесткость.

2. задание граничных условий и свойств материалов. Материал конструкции принимается как изотропная упругая среда с заданными свойствами используемой стали. Вводится вектор гравитации ( $g=9,81 \text{ м/с}^2$ ) и динамическая функция воздействия рельефа, задаваемая через спектральную плотность неровностей типичного поля Северо-Казахстанской области.

3. учет жидкостной фазы. Одной из особенностей модели является учет массы рабочего раствора в баке и магистралях. Жидкость моделируется как распределенная присоединенная масса, что позволяет корректно рассчитывать собственные частоты колебаний при разной степени заполнения емкости опрыскивателя.

4. математический аппарат решения. Для нахождения динамического отклика используется метод Ньюмарка, как метод прямого интегрирования уравнений движения по времени. Эта методика позволяет проследить траекторию каждой форсунки в режиме реального времени, опираясь на принятые методики, адаптированные для

сельскохозяйственных машин в современных работах по цифровизации агроинженерии, при наезде колеса опрыскивателя на единичное препятствие высотой до 100 мм [1]. Метод дает возможность получать детализированную картину колебательного процесса, оценивать динамические напряжения.

Разработанная расчетная модель обеспечивает комплексное рассмотрение конструктивных, инерционных и эксплуатационных факторов, определяющих динамическое функционирование штанги широкозахватного полевого опрыскивателя. Использование конечно-элементной идеализации в сочетании с корректным заданием граничных условий, учитывающих характеристики рельефа обрабатываемых полей Северо-Казахстанской области, а также включение массы рабочей жидкости в расчет, позволяет достоверно воспроизводить реальные режимы нагружения конструкции.

#### **Результаты исследования**

Полученные результаты создают основу для оптимизации конструкции опрыскивателя и его элементов, параметров систем стабилизации, выбора рациональных значений для конструкции и повышения её надежности в условиях случайных возмущений, что соответствует современным подходам к цифровому проектированию и импортозамещению сельскохозяйственной техники.

Дополнительно, применение метода конечных элементов обеспечивает детализированное моделирование напряженно-деформированного состояния штанги, а использование численной схемы Ньюмарка для интегрирования уравнений движения гарантирует адекватное описание динамических процессов при различных эксплуатационных режимах. Такой подход позволяет не только учитывать особенности конструкции и условий эксплуатации, но и формировать основу для оптимизации параметров опрыскивателя с целью повышения его надежности и долговечности.

В результате проведенных расчетов проводится анализ модельного ряда длин опрыскивателя, который приведен в таблице 1 с полученными данными, и показывает, что при увеличении ширины захвата обработки с 25 до 36 метров масса общей конструкции возрастает до 30%, что, в свою очередь, неизбежно ведет к экспоненциальному росту инерционных нагрузок.

Таблица 1. Сравнительная характеристика модельного ряда штанг опрыскивателей производства ТОО «AVAGRO»

<b>Параметр сравнения</b>	<b>Штанга 25 м (базовая)</b>	<b>Штанга 32 м (средняя)</b>	<b>Штанга 36 м (широкозахватная)</b>
<b>Тип конструкции</b>	Плоская / Объемная	Объемная	Объемная усиленная
<b>Масса секций, кг</b>	550	680	720
<b>Количество степеней свободы подвеса</b>	2	3	3 + гидрозамок
<b>Тип стабилизации</b>	Трапеция с амортизаторами	Механический маятник	Маятник с гидродемпфированием
<b>Критическая скорость (резонанс), км/ч</b>	12	10	8.5

Из таблицы видно, что у широкозахватных моделей (более 25 метров) наблюдается снижение порога резонансных частот, что указывает на низкую эффективность пассивной стабилизации и указывает на необходимость прецизионного расчета динамических параметров методом конечных элементов на этапе проектирования.

#### **Обсуждение**

При проектировании штанг для опрыскивания для условий северных регионов Казахстана, инженеры предприятия сталкиваются с необходимостью учета не только стандартных нагрузок, но и эксплуатационных особенностей, таких как большие посевные площади для обработки и высокая скорость движения транспорта по полю (до 40 км/ч).

Применение предложенного метода расчета на прочность узлов и конструкций опрыскивателя позволяет перейти к инновационному подходу в решении проблемы.

Для условий ТОО «AVAGRO» критически важным является расчет «вертикальной стабильности», т.е. колебаний перпендикулярных движению. Именно колебания штанги вызывают неравномерность дозирования рабочего раствора.

#### **Заключение**

Следовательно, в отличие от зарубежных аналогов, конструкции предприятия ТОО «AVAGRO» адаптированы под агрегатирование с тракторами тягового класса 2.0, что накладывает дополнительные ограничения на динамику навески.

Предлагаемая методика математического моделирования основана на последовательном применении расчетных процедур, включающих этапы дискретизации исследуемой области, формирование сеточной модели и постановку граничных условий, адекватных реальным эксплуатационным режимам. Использование метода конечных элементов обеспечивает возможность учета сложной геометрии конструкций, неоднородности материалов и нелинейных характеристик взаимодействия сред.

В рамках методики реализуется итерационный алгоритм, позволяющий поэтапно уточнять результаты моделирования и минимизировать погрешности за счет адаптивного изменения сетки и корректировки расчетных параметров. Такой подход обеспечивает высокую степень достоверности результатов расчетов на прочность и позволяет проводить виртуальные испытания в условиях, максимально приближенных к реальным.

В результате предлагаемая методика математического моделирования позволит сократить цикл натурных испытаний до 40% и повысить экологическую безопасность, за счет исключения «проливов» химикатов при резких колебаниях штанги опрыскивателя. Дополнительно, применение метода конечных элементов способствует формированию базы данных расчетных сценариев, которая может быть использована для оптимизации проектных решений и разработки регламентов безопасной эксплуатации технологического оборудования.

В ходе дальнейших исследований планируется модернизация конструкции штанги и подбора характеристик демпфирующих элементов предложенным методом, что позволит повысить производительность, надежность, долговечность и технологическую эффективность широкозахватных опрыскивателей, а также способствует решению задач импортозамещения и созданию конкурентоспособной техники и одновременно увеличить качество защиты посевов.

Литература:

1. Башилов, А.М. Цифровые методы проектирования динамических систем в агроинженерии // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – № 2. – С. 12 – 18.
2. Техническая документация ТОО «AVAGRO». Отчеты о заводских испытаниях штанг опрыскивателей (2020 – 2024 гг.). – Петропавловск, 2024.
3. Адуов, М.А. Проектирование и расчет сельскохозяйственных машин: учебник / М.А. Адуов, Е.Ж. Каспаков. – Нур-Султан: КазАТУ им. С. Сейфуллина, 2021. – 245 с.
4. Kuri, M. Dynamic analysis of large scale sprayer booms using finite element method / M. Kuri, H. Langnakens // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2022. - Vol. 45. – pp. 112–125.
5. Зенкевич, О.К. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О.К. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

References:

1. Bashilov, A.M. Digital methods of designing dynamic systems in agroengineering // Agricultural machinery and technologies. – 2023. – No. 2. – pp. 12 – 18.
2. Technical documentation of AVAGRO LLP. Reports on factory tests of spray rods (2020-2024). Petropavlovsk, 2024.
3. Aduov, M.A. Design and calculation of agricultural machinery: textbook / M. A. Aduov, E.J. Kaspakov. – Nur-Sultan: KazATU named after S. Seifullin, 2021. – 245 p.
4. Kuri, M. Dynamic analysis of large scale sprayer booms using finite element method / M. Kuri, H. Langnakens // Journal of Agricultural Engineering Research. – 2022. – Vol. 45. – pp. 112 –125.
5. Zenkevich, O.K. Finite element method in engineering: Translated from English / O.K. Zenkevich. – M.: Mir, 1975. – 541 p.

Information about the authors

**A.Y. Simonov** – corresponding author, Master of Engineering and Technology, Department of Transport and Mechanical Engineering, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [andrey85dj@mail.ru](mailto:andrey85dj@mail.ru);

**Z.Zh. Zhumekenova** – PhD, Lecturer, Department of Transport and Mechanical Engineering, Manash Kozybayev North Kazakhstan University NPLC, Petropavlovsk, Kazakhstan; e-mail: [zhumekenova82@mail.ru](mailto:zhumekenova82@mail.ru).