Научная статья

Original article

УДК 631.34

doi: https://doi.org/10.55186/25880209_2026_10_6_60

edn: XUVXNA

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ НАГРУЗОК НА ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ФЕРМЫ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОСТОВОГО АГРЕГАТА

THE EFFECT OF OPERATING LOADS ON THE DEFORMED STATE OF THE TRUSS OF A MULTIFUNCTIONAL BRIDGE UNIT



Мищенко Николай Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6002-5202, mishenko.nikolai@bk.ru.

Лебедев Денис Андреевич, кандидат сельскохозяйственных наук, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0983-1318, denislebedev992@gmail.com.

Травкин Владислав Сергеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл.,

Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1052-0125, tvs@vniiraduga.ru.

Травкина Алина Рафиковна, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0770-4292, gimazova.a@bk.ru.

Mishenko Nikolai Andreevich, candidate of technical sciences, the Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-6002-5202, mishenko.nikolai@bk.ru.

Lebedev Denis Andreevich, candidate of agricultural sciences, Junior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0004-0983-1318, denislebedev992@gmail.com.

Travkin Vladislav Sergeevich, candidate of technical sciences, Senior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0002-1052-0125, tvs@vniiraduga.ru.

Travkina Alina Rafikovna, Junior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: https://orcid.org/0009-0001-0770-4292, gimazova.a@bk.ru.

Аннотация. В статье представлены результаты исследования влияния эксплуатационных нагрузок на напряжённо-деформированное состояние несущей ферменной конструкции многофункционального мостового

агрегата, разработанного на базе дождевальной машины «Кубань». Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения прочности и жёсткости несущих конструкций сельскохозяйственных машин при расширении их функциональных возможностей и применении дополнительного технологического оборудования. Цель исследования заключалась в сравнительной оценке напряжённо-деформированного состояния фермы при различных условиях эксплуатационного нагружения. Исследования выполнены в ФГБНУ ВНИИ «Радуга» с применением метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation. Объектом исследования являлась пространственная стержневая конструкция пролётом 48 м, включающая трубопровод диаметром 168 мм. Рассмотрены две группы расчётных случаев: воздействие собственного веса конструкции с учётом и без учёта массы воды в трубопроводе, а также влияние расположения навесной косилки в середине пролёта и на расстоянии 16 м от его центра. Установлено, что при заполнении трубопровода водой максимальные эквивалентные напряжения увеличиваются с 45,79 до 112,6 МПа, а максимальное результирующее перемещение возрастает со 139,8 до 184,3 мм, или на 31,8 %. Расчётный коэффициент запаса прочности по пределу текучести снижается с 6,17 до 2,51. При изменении положения косилки максимальное результирующее перемещение увеличивается со 150,1 до 158,1 мм, или на 5,3 %. Полученные результаты позволяют оценить влияние различных эксплуатационных нагрузок на деформированное состояние фермы и обосновывают необходимость их учёта при проектировании многофункциональных мостовых агрегатов.

Abstract. The article presents the results of a study on the influence of operational loads on the stress-strain state of the load-bearing truss structure of a multifunctional bridge-type agricultural unit developed on the basis of the Kuban sprinkler irrigation machine. The relevance of the study is determined by the need to ensure the strength and stiffness of agricultural machinery structures as their

functional capabilities expand and additional technological equipment is introduced. The aim of the research was to compare the stress-strain state of the truss under different operating load conditions. The study was conducted at the All-Russian Research Institute “Raduga” using the finite element method implemented in SOLIDWORKS Simulation. The object of the study was a spatial truss structure with a span of 48 m, incorporating a pipeline with a diameter of 168 mm. Two groups of loading cases were considered: the self-weight of the structure with and without the weight of water in the pipeline, and the effect of positioning a mounted mower at the midpoint of the span and at a distance of 16 m from its center. The calculations showed that filling the pipeline with water increased the maximum equivalent stress from 45.79 to 112.6 MPa, while the maximum resultant displacement increased from 139.8 to 184.3 mm, or by 31.8%. The calculated safety factor with respect to yield strength decreased from 6.17 to 2.51. Changing the mower position increased the maximum resultant displacement from 150.1 to 158.1 mm, corresponding to an increase of 5.3%. The results provide an assessment of the influence of different operational loads on truss deformation and demonstrate the importance of considering these loads when designing multifunctional bridge-type agricultural units.

Ключевые слова: мостовой агрегат, мостовое земледелие, дождевальная машина, ферменная конструкция, напряжённо-деформированное состояние, прочность и жёсткость, эксплуатационные нагрузки

Keywords: bridge-type agricultural unit, bridge farming, sprinkler machine, truss structure, stress-strain state, strength and stiffness, operational loads

Введение. Современное развитие мелиоративного земледелия направлено на повышение эффективности использования ресурсов, совершенствование технических средств орошения и снижение негативного воздействия сельскохозяйственной техники на почвенный покров [1, 2]. Одним из перспективных направлений является применение технологий мостового земледелия, предусматривающих выполнение агротехнологических операций

широкозахватными агрегатами, перемещающимися по постоянным технологическим колеям [3, 6].

Особый интерес представляет создание многофункциональных мостовых агрегатов на базе существующих дождевальных машин, позволяющих совмещать орошение с внесением удобрений, средствами защиты растений и другими технологическими операциями [9]. Однако расширение функциональных возможностей таких машин сопровождается изменением характера и величины нагрузок на их несущие конструкции, что предъявляет дополнительные требования к прочности и жёсткости ферменных систем [8].

В ФГБНУ ВНИИ «Радуга» в рамках выполнения научно-исследовательских работ по разработке технологии мостового земледелия на мелиорируемых землях проводились исследования, направленные на обоснование конструктивных и технологических решений многофункционального мостового агрегата на базе дождевальной машины «Кубань» [7]. Одним из направлений указанных исследований являлась оценка напряжённо-деформированного состояния несущей ферменной конструкции при воздействии собственного веса, массы воды в трубопроводе и нагрузок от дополнительного навесного оборудования.

Цель исследования — сравнительная оценка напряжённо-деформированного состояния несущей фермы многофункционального мостового агрегата на базе дождевальной машины «Кубань» при различных условиях эксплуатационной нагрузки с применением метода конечных элементов.

Для достижения поставленной цели предусматривалось **решение следующих задач:**

1. Разработать расчётную модель несущей ферменной конструкции многофункционального мостового агрегата для оценки её напряжённо-деформированного состояния методом конечных элементов.
2. Определить влияние заполнения трубопровода водой на распределение напряжений и результирующие перемещения элементов фермы.

3. Оценить влияние расположения навесного технологического оборудования на деформированное состояние несущей конструкции при размещении нагрузки в середине пролёта и на расстоянии 16 м от его центра.

4. Провести сравнительный анализ результатов численного моделирования при различных условиях эксплуатационной нагрузки.

Материалы и методы. Объектом исследования являлась несущая ферменная конструкция многофункционального мостового агрегата, разработанного на базе широкозахватной дождевальной машины «Кубань». Исследуемая конструкция предназначена для выполнения технологических операций на мелиорируемых землях, включая дождевание, внесение удобрений и применение сменного навесного оборудования [4]. В качестве исходных материалов использованы конструкторская документация мостового агрегата и результаты численного моделирования его несущей конструкции.

Исследуемая ферма представляет собой пространственную стержневую конструкцию пролётом 48 м. Основными несущими элементами являются продольные пояса, поперечные и диагональные связи, выполненные из стальных труб и равнополочных уголков сечением 45 × 45 × 5 мм. В состав конструкции также входит трубопровод наружным диаметром 168 мм и толщиной стенки 3 мм, выполняющий технологическую и несущую функции.

Для оценки деформированного состояния фермы применялся метод конечных элементов, реализованный в программном комплексе SOLIDWORKS Simulation. Расчётная модель представляла собой систему стержневых элементов с жёсткими соединениями, соответствующими принятой схеме сварных узлов конструкции. При численном моделировании в качестве материала элементов фермы была принята углеродистая сталь марки 1023 (по библиотеке материалов SOLIDWORKS) с модулем упругости 205 000 МПа, коэффициентом Пуассона 0,29, плотностью 7858 кг/м³ и

пределом текучести 282,7 МПа. Материал рассматривался как однородный, изотропный и линейно-упругий.

При моделировании учитывались собственный вес элементов конструкции и дополнительные эксплуатационные нагрузки. Закрепление фермы осуществлялось посредством фиксации опорных узлов, исключающей их перемещения и повороты. Расчётная модель разбивалась на конечные элементы с использованием программного комплекса SOLIDWORKS Simulation.

Исследование включало две группы расчётов, различающихся характером и расположением действующих нагрузок. Первая группа предусматривала оценку влияния заполнения трубопровода водой на деформированное состояние несущей конструкции. Для этого рассматривались два расчётных случая: воздействие собственного веса фермы без воды в трубопроводе и совместное воздействие собственного веса конструкции и массы воды, заполняющей трубопровод диаметром 168 мм.

Вторая группа была направлена на оценку влияния расположения навесного технологического оборудования на деформированное состояние фермы. В качестве дополнительной нагрузки рассматривалось воздействие косилки, размещаемой в двух положениях: в середине пролёта и на расстоянии 16 м от его центра. При моделировании учитывались вертикальная нагрузка от веса оборудования величиной 981 Н и горизонтальная сила сопротивления его перемещению величиной 500 Н. В этом случае расчёты выполнялись без учёта массы воды в трубопроводе.

Основным показателем для сравнительной оценки деформированного состояния конструкции являлось максимальное результирующее перемещение (URES), определяемое как модуль вектора перемещений элементов фермы. Дополнительно рассчитывалось относительное перемещение как отношение его максимального значения к длине пролёта. Для количественной оценки влияния эксплуатационных нагрузок определялось процентное изменение максимальных результирующих

перемещений относительно базового расчётного случая в каждой группе исследований.

Результаты и обсуждение. В результате численного моделирования установлены особенности напряжённо-деформированного состояния несущей ферменной конструкции многофункционального мостового агрегата при различных условиях эксплуатационной нагрузки.

На первом этапе выполнено моделирование фермы под действием собственного веса без учёта массы воды в трубопроводе. Согласно результатам расчёта, максимальные эквивалентные напряжения составили 45,79 МПа при пределе текучести принятого материала 282,7 МПа. Расчётный коэффициент запаса прочности по пределу текучести составил 6,17. Максимальное результирующее перемещение достигло 139,8 мм.

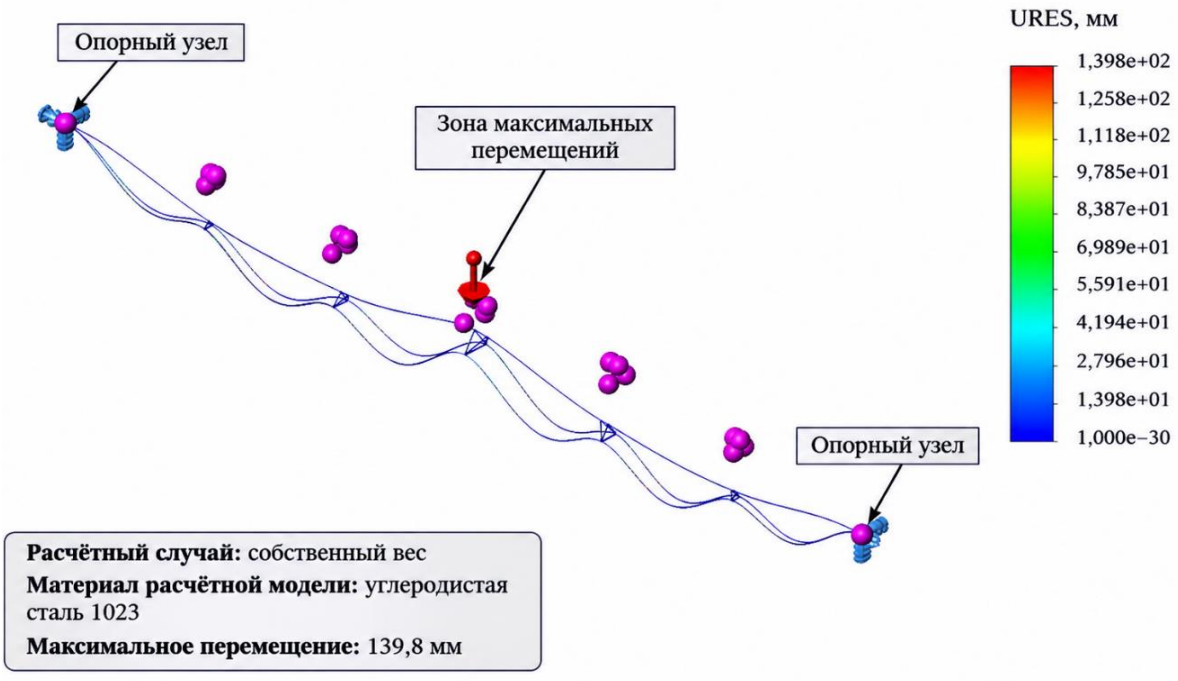

Рисунок 1. Распределение результирующих перемещений несущей конструкции мостового агрегата под собственным весом

При учёте массы воды в трубопроводе диаметром 168 мм максимальные эквивалентные напряжения увеличились с 45,79 до 112,6 МПа, то есть в 2,46 раза, а максимальное результирующее перемещение возросло с 139,8 до 184,3 мм, или на 31,8 %. При этом расчётный коэффициент запаса прочности

по пределу текучести снизился с 6,17 до 2,51. Полученные результаты свидетельствуют о существенном влиянии дополнительной нагрузки от воды на напряжённо-деформированное состояние несущей ферменной конструкции и необходимости её учёта при оценке прочности и жёсткости мостового агрегата.

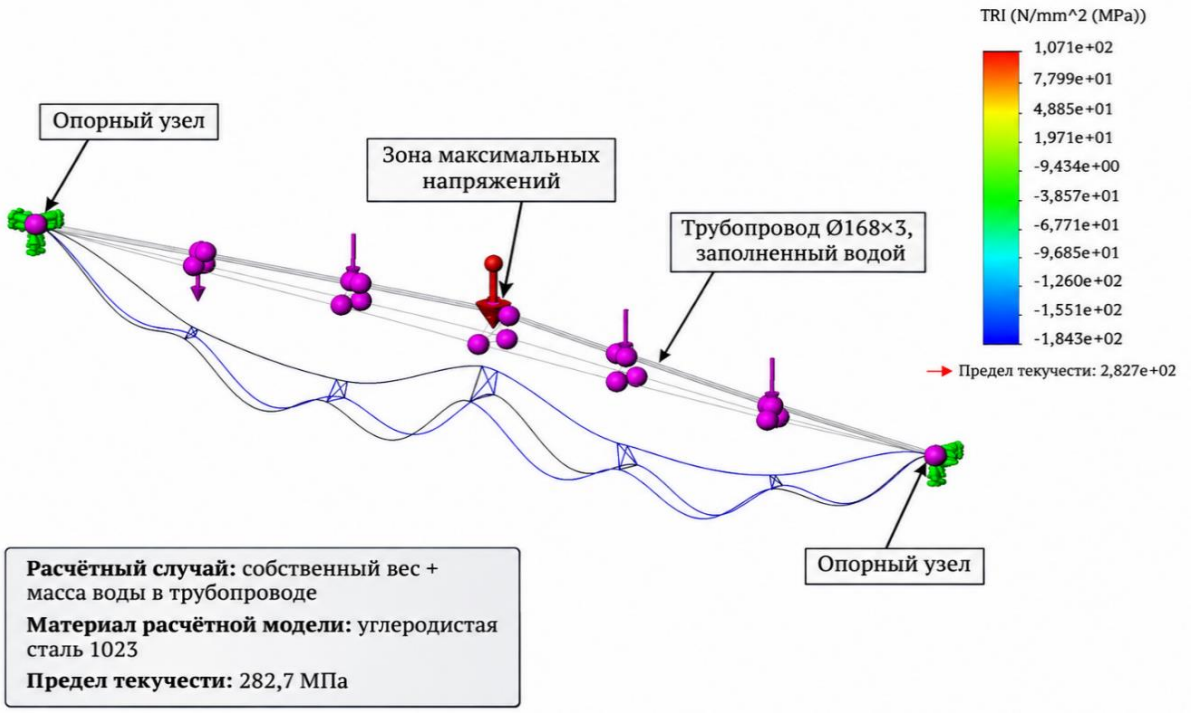

Рисунок 2. Распределение результирующих перемещений несущей конструкции мостового агрегата под собственным весом с учетом массы воды в трубопроводе

Сравнительные показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчётов фермы при воздействии собственного веса и массы воды в трубопроводе

Показатель	Собственный вес	Собственный вес и масса воды
Длина пролёта, м	48	48
Максимальные эквивалентные напряжения, МПа	45,79	112,6
Максимальное результирующее перемещение, мм	139,8	184,3
Относительное результирующее перемещение	1/343	1/260
Коэффициент запаса прочности по текучести	6,17	2,51

Анализ эпюр показывает, что в обоих расчётных случаях наибольшие перемещения формируются в пролётной части конструкции. При заполнении трубопровода водой происходит увеличение деформаций, что необходимо учитывать при оценке эксплуатационной жёсткости фермы.

На следующем этапе рассмотрено влияние положения навесного технологического оборудования на деформированное состояние несущей конструкции мостового агрегата. В качестве дополнительной нагрузки учитывалось воздействие косилки, размещаемой в двух положениях: в середине пролёта и на расстоянии 16 м от его центра. В обоих случаях вертикальная нагрузка от веса оборудования составляла 981 Н, горизонтальное усилие сопротивления перемещению — 500 Н.

По результатам численного моделирования установлено, что при центральном расположении косилки максимальное результирующее перемещение фермы составило 150,1 мм. При смещении оборудования на расстояние 16 м от середины пролёта данный показатель увеличился до 158,1 мм. Таким образом, изменение положения навесного оборудования сопровождалось увеличением максимального перемещения на 8 мм, или на 5,3 %.

Сравнительные результаты расчётов представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние положения навесной косилки на деформированное состояние фермы

Показатель	В центре пролёта	16 м от центра
Длина пролёта, м	48	48
Вертикальная нагрузка, Н	981	981
Горизонтальная нагрузка, Н	500	500
Максимальное результирующее перемещение, мм	150,1	158,1
Относительное результирующее перемещение	1/320	1/304
Увеличение перемещения относительно центрального положения, %	—	5,3

Характер распределения результирующих перемещений фермы для двух рассмотренных положений косилки представлен на рисунках 3 и 4.

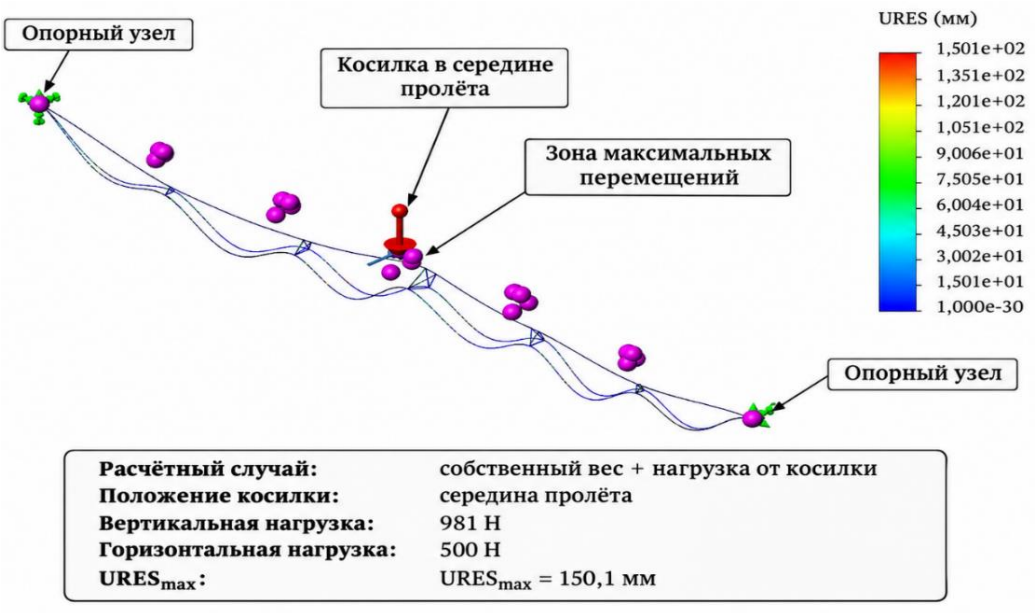

Рисунок 3. Распределение результирующих перемещений фермы мостового агрегата при расположении косилки в середине пролёта

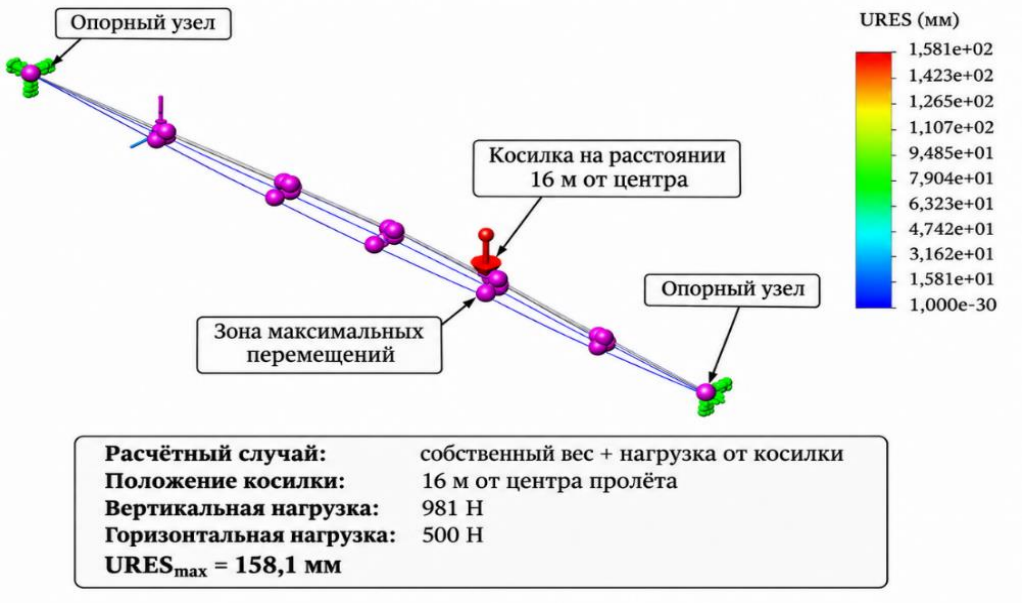

Рисунок 4. Распределение результирующих перемещений фермы мостового агрегата при расположении косилки на расстоянии 16 м от центра пролёта

Анализ полученных результатов свидетельствует о влиянии расположения навесного оборудования на деформированное состояние ферменной конструкции. Полученные различия указывают на необходимость учёта положения дополнительных рабочих органов при оценке эксплуатационной жёсткости несущей конструкции мостового агрегата.

Изменение точки приложения нагрузки приводит к перераспределению внутренних усилий в элементах фермы и изменению характера её деформирования. При этом сравнительно небольшое различие максимальных результирующих перемещений для двух рассмотренных положений косилки свидетельствует об относительно близких показателях деформированного состояния конструкции в исследованных условиях нагрузки.

В целом результаты численного моделирования показывают, что напряжённо-деформированное состояние несущей конструкции многофункционального мостового агрегата зависит от характера эксплуатационной нагрузки. Заполнение трубопровода водой сопровождается увеличением максимальных эквивалентных напряжений и результирующих перемещений фермы, тогда как изменение положения

навесного оборудования оказывает влияние на её деформированное состояние. При этом в рассмотренных расчётных случаях более выраженное изменение максимального результирующего перемещения наблюдается при учёте массы воды в трубопроводе.

Выводы. Проведена сравнительная оценка напряжённо-деформированного состояния несущей ферменной конструкции многофункционального мостового агрегата на базе дождевальной машины «Кубань» при различных условиях эксплуатационной нагрузки с применением метода конечных элементов. Установлено, что при учёте массы воды в трубопроводе максимальные эквивалентные напряжения увеличиваются с 45,79 до принятого для анализа значения 112,6 МПа, или в 2,46 раза, а максимальное результирующее перемещение возрастает со 139,8 до 184,3 мм, или на 31,8 %. При этом расчётный коэффициент запаса прочности по пределу текучести снижается с 6,17 до 2,51. Выявлено влияние расположения навесного технологического оборудования на деформированное состояние фермы. При размещении косилки в середине пролёта максимальное результирующее перемещение составило 150,1 мм, а при смещении на расстояние 16 м от центра — 158,1 мм, что соответствует увеличению на 5,3 %. Полученные результаты свидетельствуют о необходимости учёта дополнительных эксплуатационных нагрузок и положения навесного оборудования при проектировании многофункциональных мостовых агрегатов, а также обосновывают целесообразность дальнейшего совершенствования несущей конструкции с целью повышения её пространственной жёсткости и эксплуатационной надёжности. Такой подход согласуется с общими принципами совершенствования ресурсосберегающих технических средств орошения, предусматривающими комплексный учёт конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов [5].

Список источников

1. Есин, А. И. Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия / А. И. Есин, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев. – Саратов: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУБиК», 2019. – 214 с. – ISBN 978-5-91818-614-5. – EDN NKFGPB.

2. Мищенко, Н. А. Влияние параметров мостового агрегата на повышение экологичности полива и снижения деградационного воздействия на почву / Н. А. Мищенко // Экология и строительство. – 2024. – № 2. – С. 29-34. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-02-005. – EDN ZAPLFG.

3. Мищенко, Н. А. Автоматизированные системы управления широкозахватными дождевальными машинами: анализ и перспективы применения в мостовом земледелии / Н. А. Мищенко, Д. А. Лебедев // International Agricultural Journal. – 2025. – Т. 68, № 6. – С. 207-221. – DOI 10.55186/25880209_2025_9_6_14. – EDN DXMFKN.

4. Мищенко, Н. А. Перспективы развития многоцелевого использования многоопорных дождевальных машин / Н. А. Мищенко // Вестник мелиоративной науки. – 2024. – № 3. – С. 176-181. – EDN KEPRZH.

5. Ольгаренко Г.В. Ресурсосберегающие эффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения. Справочник / Г.В. Ольгаренко, В.И. Городничев, А.А. Алдошкин -М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. -264 с. EDN: YSVGCX.

6. Снипич, Ю. Ф. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: специальность 06.01.02 "Мелиорация, рекультивация и охрана земель": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Снипич Юрий Фёдорович. – Новочеркасск, 2011. – 340 с. – EDN SUNZCV.

7. Турапин С.С., Мищенко Н.А., Брыль С.В., Рязанцев А.И. и др. Обосновать и разработать технологию мостового земледелия на мелиорируемых землях с применением современных технологий информационного обеспечения и автоматизации процессов

сельскохозяйственного производства, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», отчет о НИР, 2023, EDN: UDBZXG.

8. Турапин С.С., Рязанцев А.И. и др. Проведение исследований и разработка энергосберегающих ходовых систем многоопорных широкозахватных дождевальных машин, снижающих удельное давление и деградацию почвы орошаемых участков", ФГБНУ ВНИИ "Радуга", отчет НИР, 2019. EDN: NUBEOZ.

9. Эколого-энергетическое совершенствование многоопорных дождевальных машин / С. С. Турапин, Г. В. Ольгаренко, А. И. Рязанцев, А. О. Антипов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 30-36. – DOI 10.32962/0235-2524-2021-1-30-36. – EDN NLQPHR.

References

1. Yesin, A. I., Zhuravleva, L. A., & Solovyov, V. A. (2019). Resource-saving technologies and center-pivot irrigation machines. Saratov: KUBiK Publishing House. 214 p. ISBN 978-5-91818-614-5. EDN NKFGPB.

2. Mishchenko, N. A. (2024). Influence of bridge-type agricultural unit parameters on improving the environmental sustainability of irrigation and reducing soil degradation. Ecology and Construction, (2), 29–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-02-005. EDN ZAPLFG.

3. Mishchenko, N. A., & Lebedev, D. A. (2025). Automated control systems for wide-span sprinkler irrigation machines: Analysis and prospects for application in bridge farming. International Agricultural Journal, 68(6), 207–221. DOI: 10.55186/25880209_2025_9_6_14. EDN DXMFKN.

4. Mishchenko, N. A. (2024). Prospects for the development of multipurpose applications of multi-span sprinkler irrigation machines. Bulletin of Land Reclamation Science, (3), 176–181. EDN KEPRZH.

5. Olgarenko, G. V., Gorodnichev, V. I., & Aldoshkin, A. A. (2015). Resource-saving, efficient, and environmentally friendly irrigation technologies and technical equipment: A handbook. Moscow: Rosinformagrotekh. 264 p. EDN YSVGCX.

6. Snipich, Yu. F. (2011). Intensification of irrigation technologies and improvement of sprinkler irrigation equipment. Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, specialty 06.01.02 “Land Reclamation, Recultivation and Land Protection”. Novocherkassk. 340 p. EDN SUNZCV.

7. Turapin, S. S., Mishchenko, N. A., Bryl, S. V., Ryazantsev, A. I., et al. (2023). Substantiation and development of bridge farming technology on reclaimed lands using modern information support technologies and automation of agricultural production processes. Research Report. All-Russian Research Institute “Raduga”. EDN UDBZXG.

8. Turapin, S. S., Ryazantsev, A. I., et al. (2019). Research and development of energy-saving running gear systems for multi-span, wide-span sprinkler irrigation machines aimed at reducing specific ground pressure and soil degradation in irrigated areas. Research Report. All-Russian Research Institute “Raduga”. EDN NUBEOZ.

9. Turapin, S. S., Olgarenko, G. V., Ryazantsev, A. I., & Antipov, A. O. (2021). Ecological and energy efficiency improvements of multi-span sprinkler irrigation machines. Land Reclamation and Water Management, (3), 30–36. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-1-30-36. EDN NLQPHR.

© Мищенко Н.А., Лебедев Д.А., Травкин В.С., Травкина А.Р. 2026. International agricultural journal, 2026, № 6, 88-103.