

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 624.132.3

doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-62-71

3D-МОДЕЛИРОВАНИЕ УСИЛИЙ В РАБОЧЕМ ОБОРУДОВАНИИ ОТВАЛА БУЛЬДОЗЕРА С ВЫДВИЖНЫМИ СЕКЦИЯМИ

Даниил Евгеньевич Щепалин¹, Любовь Александровна Сладкова²✉

^{1,2} Российский университет транспорта, Москва, Россия

¹ dany.shepalin2014@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-1447-4616>

² rich.cat2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

Аннотация

Цель исследования. Для интенсификации способов разработки грунта большое внимание уделяется изменению формы отвальной поверхности, которое связано с проведением исследований по оценке изменения показателей усилий копания грунта и производительности машины, а также удельного показателя – энергоёмкости процесса копания грунта. Введение в строй техники с усовершенствованной и научно-обоснованной формой отвальной поверхности позволит решить поставленные выше задачи.

Задача, решению которой посвящена статья. Предлагаемое усовершенствованная конструкция многосекционного отвала позволяет варьировать положение секций за счет их перемещения вперед-назад, изменять углы установки в плане и резания, что позволяет достигать результатов, связанных со снижением усилий копания грунта и повышением производительности машины. Результат достигается за изменения вылета системы гидроцилиндров управления каждой секцией. Обоснованием работоспособности предлагаемой конструкции являются современные методы расчета на основе 3D-моделирования усилий в рабочем оборудовании отвала.

Методы исследования заключаются в обосновании выбора расчетной схемы конструкции, способов заделки и распределения нагрузки на рабочем органе (отвале) при самом неблагоприятном случае нагружения.

Новизна работы. Расчеты усилий в рабочем оборудовании отвала, проведенные на основе 3D-моделирования позволили установить влияние распределенной нагрузки на отвале в случае набора полной призмы волочения на изменение усилий в штоках гидроцилиндров в момент потери ими устойчивости, являющейся причиной их отказов.

Результаты исследования. Анализ расчетов позволил выявить физическую природу нагруженности штоков гидроцилиндров в предлагаемой конструкции отвала бульдозеров и оценить ее количественно.

Выводы. Изменение величины нагрузки на отвале позволит автоматизировать процесс управления секциями отвала для исключения превышения нагрузки на рабочее оборудование секций отвала.

Ключевые слова: отвал, секции, оборудование, автоматизация, рабочий процесс, грунт, разработка, 3D-моделирование.

Благодарности: Авторы выражают искреннюю благодарность членам редакционной коллегии журнала, рецензентам.

Ссылка для цитирования:

Щепалин Д.Е. 3D-моделирование усилий в рабочем оборудовании отвала бульдозера с выдвижными секциями / Д.Е. Щепалин, Л.А. Сладкова // Транспортное машиностроение. – 2026. - № 7. – С. 62-71. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-62-71.

Original article

Open Access Article

3D MODELING OF FORCES IN WORK EQUIPMENT OF BULLDOZER BLADES WITH EXTENDABLE SECTIONS

Daniil Evgenievich Shchepalin¹, Lyubov Aleksandrovna Sladkoba²✉

^{1,2} Russian University of Transport, Moscow, Russia

¹ dany.shepalin2014@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-1447-4616>

² rich.cat2012@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6786-0386>

Abstract

Study objective. To intensify methods of soil mining, much attention is paid to changing the shape of the dump surface, which is associated with conducting research to assess changes in the indicators of digging forces and machine performance, as well as the specific indicator i.e. the energy intensity of the digging process. The introduction of equipment with an improved and scientifically based form of the dump surface will allow us to solve the tasks set above.

The task that the paper is devoted to. The proposed improved design of the multi-section blade allows varying the position of the sections by moving them back and forth, changing the angles of installation and cutting, which makes it possible to achieve results related to reducing digging efforts and increasing machine productivity. The result is achieved by changing the extension of the hydraulic cylinder control system for each section. The grounds for the operability of the proposed design is modern calculation methods based on 3D modeling of forces in the working equipment of the dump.

The research methods include substantiating the choice of the design scheme of the structure, methods of sealing and load distribution on the working body (blade) in the most unfavorable case of loading.

The novelty of the work. Calculations of the forces in the working equipment of the blade, carried out on the basis of 3D modeling, made it possible to find out the effect of a distributed load on the blade in the case full drawing prism on the change in forces in the rods of hydraulic cylinders at the time of their loss of stability, which is the cause of their failures.

The study results. The analysis of calculations made it possible to identify the physical nature of loading of hydraulic cylinder rods in the proposed design of the bulldozer blade and to quantify it.

Conclusions. Changing the load on the blade makes it possible to automate the process of controlling the blade sections to avoid exceeding the load on the working equipment of the blade sections.

Keywords: dump, sections, equipment, automation, workflow, soil, development, 3D modeling.

Acknowledgements: The authors acknowledge the members of the editorial board of the journal and the reviewers.

Reference for citing:

Shchepalin DE, Sladkova LA. 3D modeling of forces in work equipment of bulldozer blades with extendable sections. *Transport Engineering*. 2026;7:62-71. doi: 10.30987/2782-5957-2026-7-62-71.

Введение

Усовершенствования рабочего оборудования бульдозера с выдвижными секциями, позволяющих изменять в процессе разработки грунта углы резания, установки в плане и использовать эффект уменьшения коэффициента блокировки (рис. 1) [1,

2, 3], позволяет снижать энергоемкость процесса копания грунта, увеличивать производительность на грунтах различной категории трудности разработки, а также для возможности автоматизации процесса управления [4].

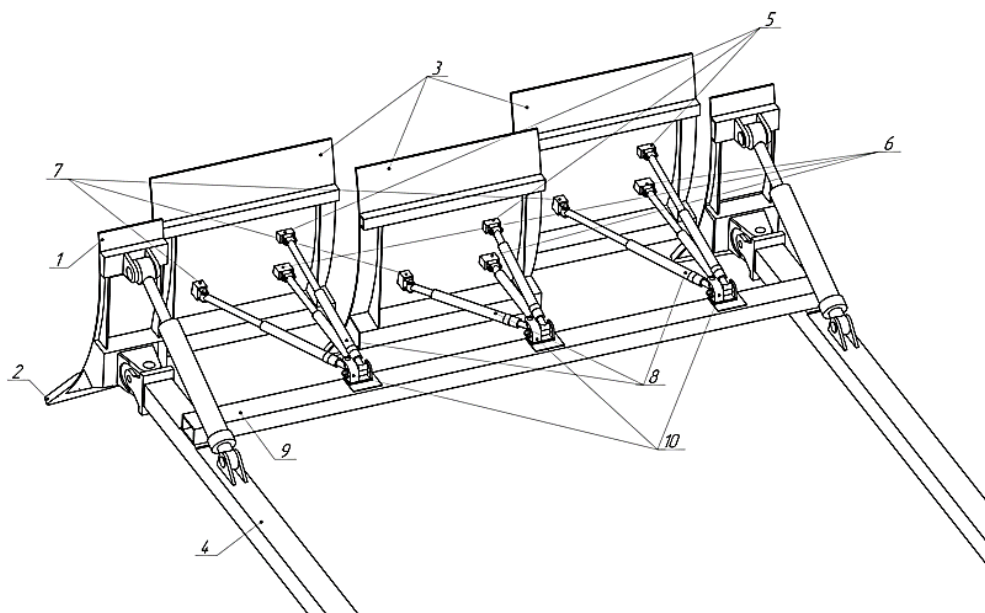


Рис. 1. Рабочее оборудование бульдозера
Fig. 1. Working equipment of a bulldozer

Конструкция и принцип действия усовершенствованной секции отвала бульдозера

В предлагаемом рабочем оборудовании бульдозера управление секциями 3 осуществляется гидроцилиндрами 8, закрепленными в шарнирном устройстве [3] со стороны поршневой части, размещенной на поперечной балке 9, жестко соединенной с толкающими брусками 4. Штоковая часть гидроцилиндров шарнирно закреплена в кронштейнах 5, 6 и 7, размещенных в трех разных точках на тыльной стороне каждой секции 3 отвала с возможностью поворота гидроцилиндров 8 относительно осей шарниров. При этом три точки размещения кронштейнов 5 и 6 рас-

полагаются на вертикали тыльной стороны отвала, а кронштейны 6 и 7 – по горизонтали каждой секции 3 отвала 1.

При одновременном выдвижении штоков гидроцилиндров, расположенных в кронштейнах 5, 10 и 6, 10 происходит изменение угла установки отвала в плане, а при одновременном выдвижении штоков гидроцилиндров, расположенных в кронштейнах 6, 10 и 7, 10 изменяется угол резания [1], что позволяет интенсифицировать процесс копания грунта отвалом бульдозера.

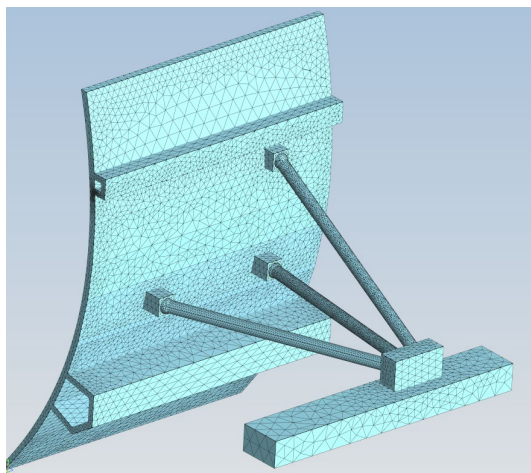
3D-моделирование усилий в рабочем оборудовании секции отвала

Для верификации исследований, проведенных в [1], предлагается 3-D модель расчета усилий на рабочем оборудовании предлагаемого отвала бульдозера.

Одной из задач является оценка усилий на элементах рабочего оборудования, в частности, гидроцилиндров, в программе «Компас – 3D v 19», которая имеет базу данных об основных материалах, исполь-

зуя библиотеку *APR_FEM* (прочностной анализ с использованием метода конечных элементов) [6, 7].

Выбранная конечно-элементная сетка для рассчитываемой конструкции содержит 82894 конечных элементов в форме 4-х узловых тетраэдров и 22763 узлов (рис. 2 а). Узлы крепления стержней – шарниры (рис. 2б).



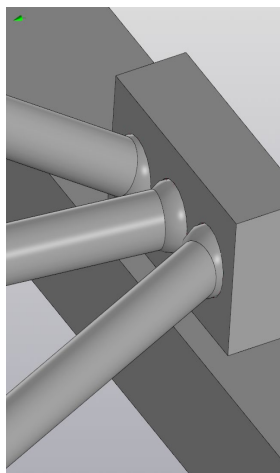
а)

Рис. 2. Расчетная схема модели:

а – разбиение на конечные элементы; б – выбор крепления

Fig. 2. Calculation model:

a – breakdown into finite elements; б – fastening selection



б)

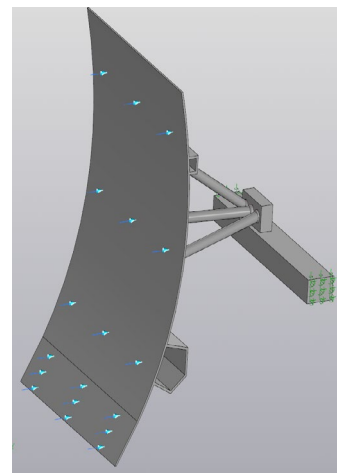


Рис. 3. Нагрузка, действующая на отвал

Fig. 3. Load acting on the blade

В предлагаемых методах расчета [8, 9] для определения усилий в гидроцилиндрах, нагрузка на рабочем оборудовании бульдозера во всех пяти расчетных положениях принимается приведенной и сосредоточенной по режущей кромке отвала, что по сути позволяет оценить действие

только усилия резания равномерно распределенного по отвальной поверхности. В предлагаемой нами расчетной схеме усилие сопротивления копанию грунта считаем равномерно распределенной по отвальной поверхности, т.е. в момент набора полной призмы волочения (рис. 3). В рас-

четной схеме (рис. 3б) учтено шарнирное закрепление гидроцилиндров в опорах на балке и отвале, а также жесткое крепление поперечной балки.

Учитывая, что отвальная поверхность представляет собой пластину, нагрузку, действующую на каждую секцию отвала при прямо-установленном отвале, принимаем равной $0,47 \text{ Н/мм}^2 = 0,47 \text{ МПа}$.

Для оценки изменения усилий в штоках гидроцилиндров использовался метод сечений, в соответствии с которым гидроцилиндр 8 (рис. 1), представленный в виде стержня (рис. 4а), разбивался сечениями на равные участки длиной l (рис. 4б), а каждое сечение делилось на 6 частей (рис. 4в).

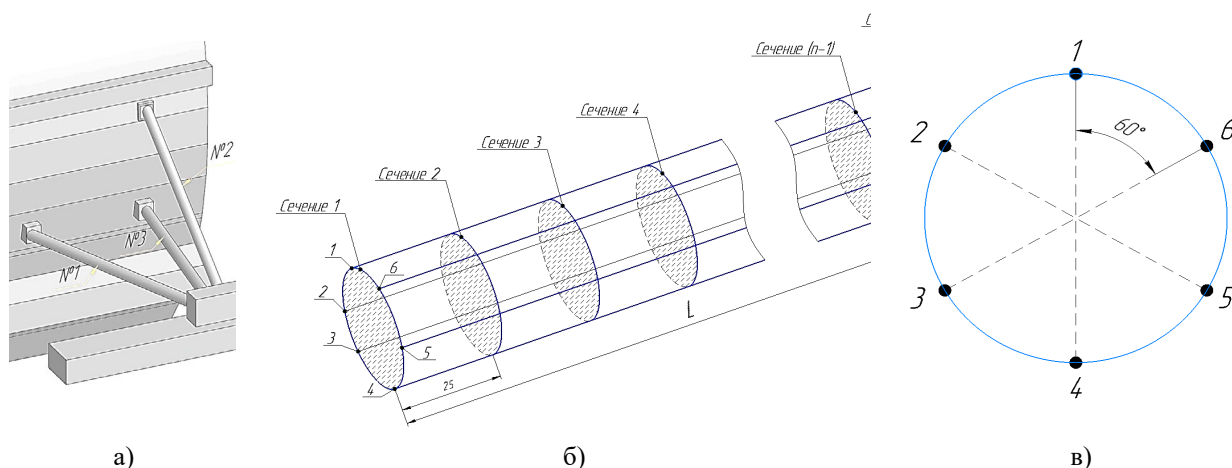


Рис. 4. Методика определения изменения усилий в стержнях расчетной схемы по длине и по сечениям:

а – нумерация стержней; б – сечения по длине стержня; в – точки замера в поперечном сечении

Fig. 4. Methodology for determining changes in forces in the design model bars along their length and across their cross-sections:

a – bar numbering; b – cross-sections along the bar's length; c – measurement points in the cross-section

Отсчет длины стержней выдвинутых штоков гидроцилиндров принимался с определенным шагом, начиная от кронштейна крепления гидроцилиндра, установленного на поперечной балке. Отсчет

начинался от точки 1, расположенной на продольной образующей стержня. Было выбрано 10 сечений по каждому стержню с соответствующими длинами 853, 850 и 777 мм при прямо установленном отвале.

Анализ усилий в рабочем оборудовании секции отвала бульдозера.

Графическая интерпретация изменения усилий и перемещений в стержнях в отсеке приведены на рис. 5.

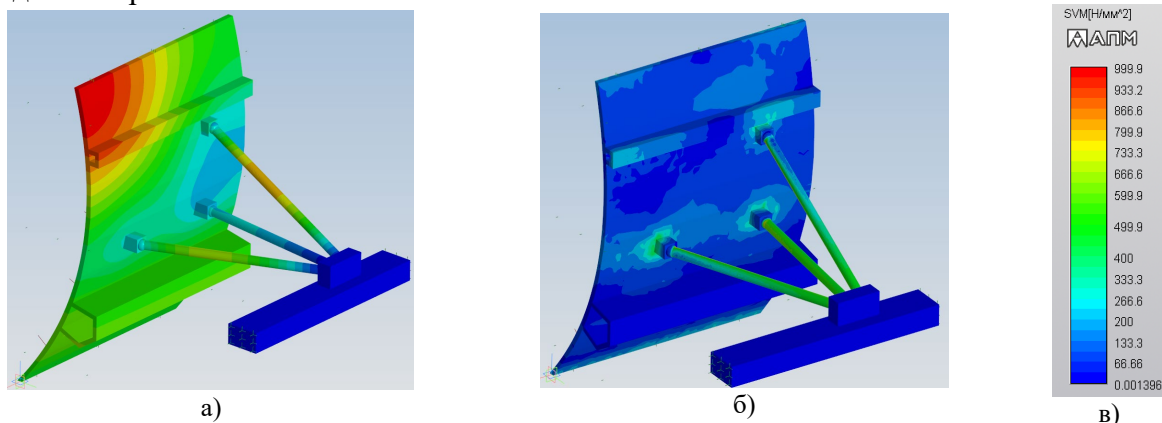


Рис. 5. Изменение напряженно-деформированного состояния в секции предлагаемого отвала бульдозера:

а – перемещения, мм; б – напряжения, МПа; в – индикаторная шкала изменения напряжений

Fig. 5. Change in the stress-strain state in a section of the proposed bulldozer blade:

a – displacement, mm; б – stress, MPa; в – stress change indicator scale

На рис. 5 видно, что наиболее нагруженной является часть отвальной поверхности, расположенной за гидроцилиндром, расположенным за штоком расположенным по горизонтали, что объясняет причину изнашивания лобового листа отвала в верхней его части (из практических наблюдений бульдозеров в процессе эксплуатации).

Визуализация распределения усилий в стержнях показывает, что менее всего нагружен стержень 3, а максимальная

нагрузка приходится на стержень 2. Причем величина этих усилий изменяется в зависимости от величины распределенной по отвалу нагрузки, что видно в сравнительном варианте (рис. 5а, б).

Результаты расчетов изменения напряжений в стержнях секции отвала приведены в табл. 1.

Графическая интерпретация изменения напряжений в стержнях приведены на рис. 6–8.

Таблица 1

Результаты расчетов изменения напряжений (МПа) в стержнях секции отвала

Table 1

Results of calculations of stress changes (MPa) in the rods of the dump section

Номер сечения по длине	Номер гидроцилиндра (стержня) в соответствии с рис. 1 и 4а					
	Стержень 1, длина $L_1 = 853$ мм					
	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6
1	231	230	235	196	210	220
2	191	172	173	190	207	205
3	193	157	159	195	220	218
4	191	147	145	190	232	230
5	197	135	127	189	246	243
6	193	121	120	204	254	248
7	198	107	107	201	272	267
8	193	100	95	185	274	277
9	205	87	80	191	300	300
10	204	91	81	225	306	306
Стержень 2, длина $L_2 = 850$ мм						
	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6
1	184	218	224	229	202	202
2	167	185	194	209	200	185
3	151	180	200	226	208	178
4	131	171	215	246	216	170
5	117	164	218	264	225	166
6	100	163	230	282	244	170
7	83	158	250	292	240	154
8	61	158	250	319	255	161
9	52	138	238	336	250	139
10	38	146	258	352	260	160
Стержень 3, длина $L_3 = 853$ мм						
	точка 1	точка 2	точка 3	точка 4	точка 5	точка 6
1	201	191	220	182	171	171
2	179	187	187	178	168	170
3	181	191	196	178	164	165
4	177	195	198	177	161	160
5	179	200	202	174	164	157
6	178	203	209	180	150	156
7	178	212	213	179	146	150
8	177	211	215	182	143	145
9	177	214	224	179	142	142
10	187	218	220	186	135	142

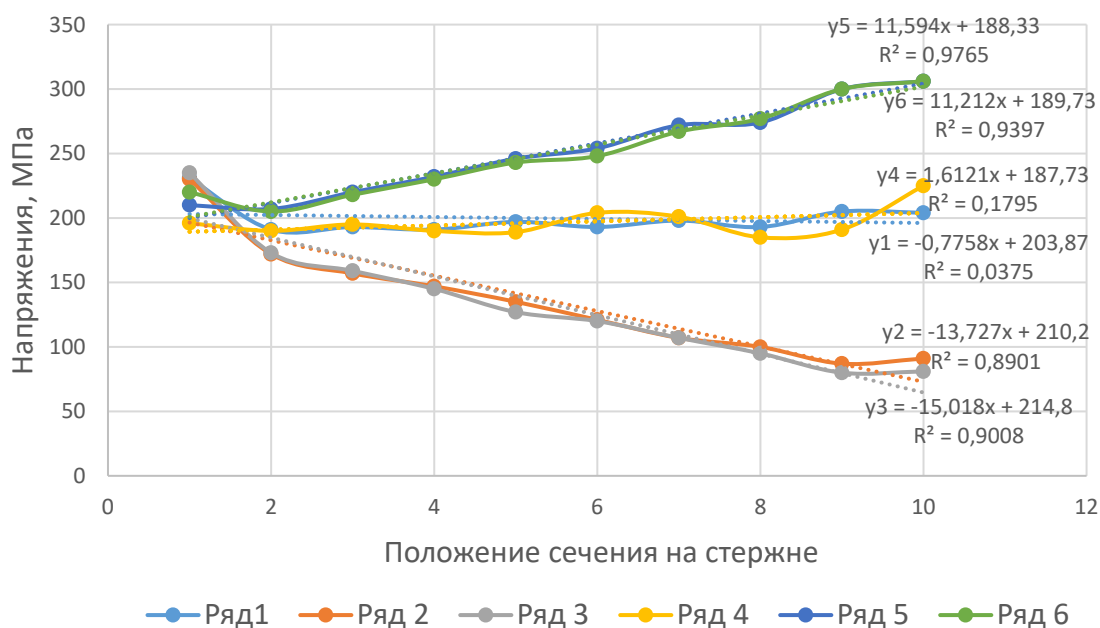


Рис. 6. Изменение напряжений по длине стержня 1 в точках поперечного сечения 1, 2, 3, 4, 5, 6.
 Fig. 6. Change in stress along the length of rod 1 at cross-section points 1, 2, 3, 4, 5, 6.

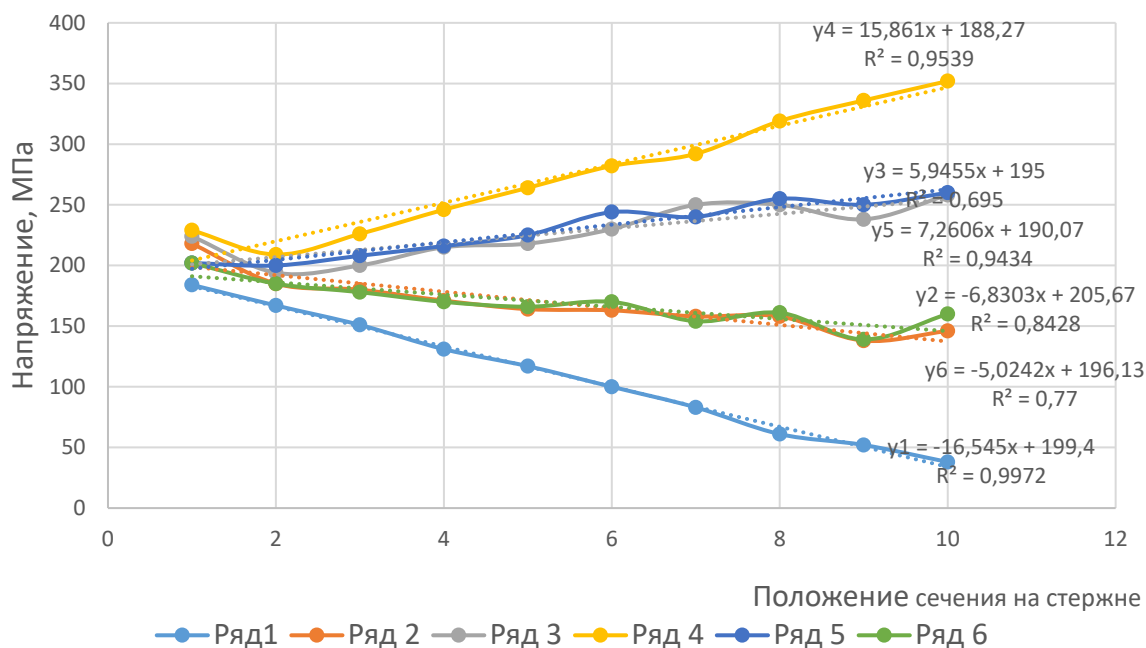


Рис. 7. Изменение напряжений по длине стержня 2 в точках поперечного сечения 1, 2, 3, 4, 5, 6.
 Fig. 7. Change in stress along the length of rod 2 at cross-section points 1, 2, 3, 4, 5, 6

Анализ рис. 6, 7, 8 показывает, что каждое изменение напряжений $\sigma = y_i$ характеризуется линейной зависимостью типа $\sigma = y_i = al + b$, где l – расстояние начиная от кронштейна крепления гидроцилиндра, уста-

новленного на поперечной балке до следующего i -го поперечного сечения, характеризуемого соответствующей точкой от 1 до 10 (табл. 2) при среднестатистическом коэффициенте рассеяния не менее 0,8.

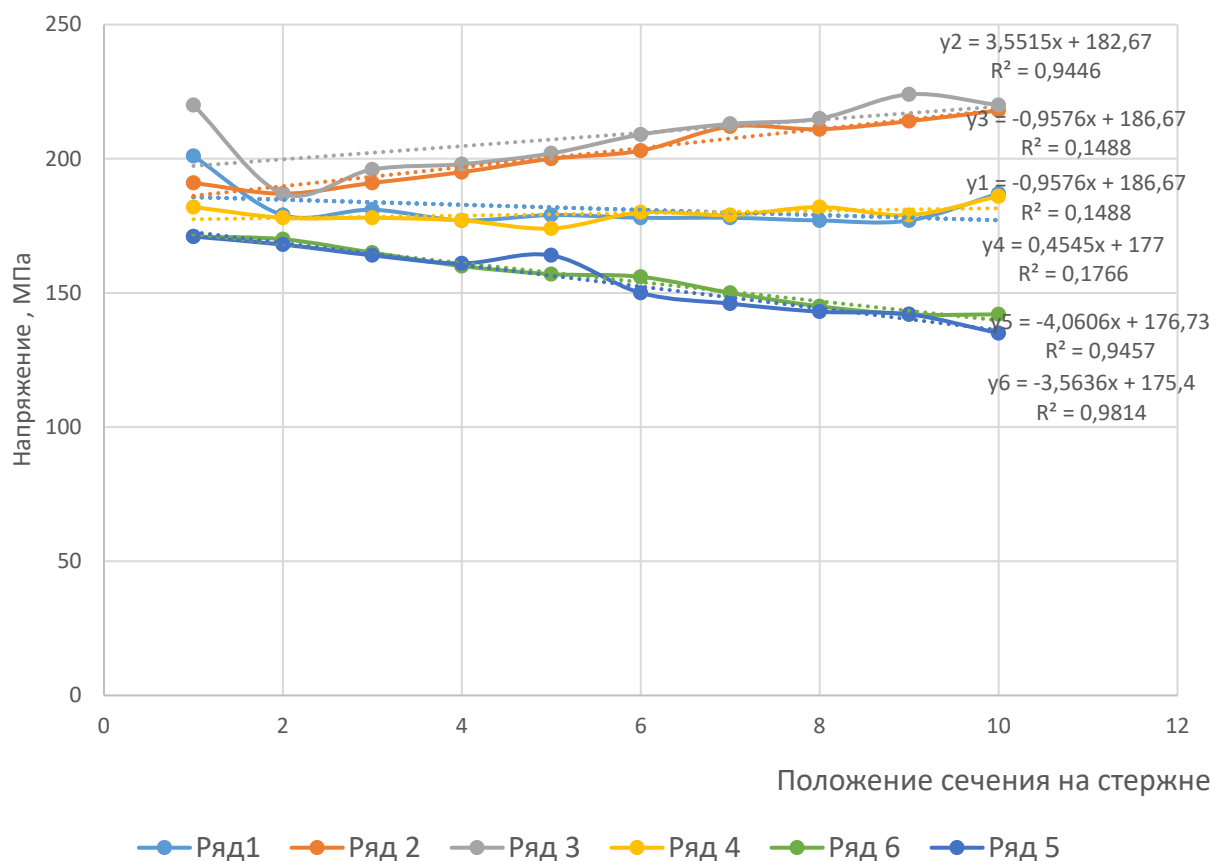


Рис. 8. Изменение напряжений по длине стержня 3 в точках поперечного сечения 1, 2, 3, 4, 5, 6
 Fig. 8. Change in stress along the length of rod 3 at cross-section points 1, 2, 3, 4, 5, 6

Таблица 2

Зависимости изменения напряжений по длине стержней по сечениям

Table 2

Dependencies of stress changes along the length of rods by cross-sections

Точка на поперечном сечении стержня	Номер стержня		
	Напряжения, МПа		
	1	2	3
1	$-0,776x + 203,87$	$-16,545x + 199,40$	$-0,957x + 186,67$
2	$-13,727x + 210,2$	$-6,830x + 205,67$	$3,551x + 182,67$
3	$-15,018x + 214,80$	$5,945x + 195,00$	$-0,957x + 186,67$
4	$1,612x + 187,73$	$15,861x + 188,27$	$0,455x + 177,00$
5	$11,594x + 188,33$	$7,260x + 190,07$	$-4,060x + 176,73$
6	$11,212x + 189,73$	$-5,024x + 196,13$	$-3,563x + 175,40$

Также из полученных зависимостей в табл. 2 и на рис. 6–8 очевидна парность изменения напряжений в стержнях системы по сечению в зависимости от распределенной нагрузки по поверхности отвала, предлагаемой конструкции.

Другими словами гидроцилиндры, закрепленные на тыльной стороне отвала на одной горизонтали (стержни 1 и 3), имеют одинаковую парность напряжений, которые можно описать линейными зави-

симостями. При этом парные напряжения имеют соответствующие друг другу невысокие погрешности.

В поперечных сечениях стержней 1–4 – напряжения практически постоянные по всей длине стержня, в точках 2–3 для гидроцилиндра 1 напряжение по длине снижается, а для гидроцилиндра 3 повышается. В точках 5–6 для гидроцилиндра 1 напряжение по длине повышается, а для гидроцилиндра 3 снижается.

Совсем иначе выглядит картина для стержня 2, расположенного на одной вертикали со стержнем 3. Усилия в точках 3 и 5 возрастают по длине стержня 2, а в точках 5 и 6 снижаются. Усилия в точках 1 и 4 имеют кососимметричное изменение (в точке 1 – снижение напряжения, а в точке 4 – возрастание).

Причем изменение парных напряжений относительно горизонтали происходит

симметрично, что свидетельствует о наличии потери устойчивости стержнями при заданной нагрузке. Другими словами, волокна стержней, имеющие тенденцию к увеличению, являются растянутыми, а волокна стержней, имеющие тенденцию к уменьшению, являются сжатыми.

Полученный вывод подтверждается результатами исследования перемещений в стержнях (табл. 3).

Таблица 3

Результаты определения изменения перемещений VSUM (мм)
в гидроцилиндрах секции отвала

Table 3

Results of determining the change in displacement VSUM (mm) in the hydraulic cylinders of the blade section

Номер сечения по длине	Номер гидроцилиндра (стержня) в соответствии с рис. 1 и 4а		
	1	2	3
1	0,18	0,21	0,11
2	0,62	0,79	0,22
3	1,02	1,24	0,36
4	1,34	1,66	0,48
5	1,59	1,9	0,58
6	1,73	2,1	0,64
7	1,76	2,11	0,67
8	1,64	1,89	0,67
9	1,4	1,47	0,64
10	0,98	0,85	0,6

Из табл. 3 видно, что величина относительных перемещений не превышает допустимую при выбранных длинах стержней (штоков гидроцилиндров) более 500 мм.

Графическая интерпретация проведенных исследований приведена на рис. 9 и представляет собой кривые второго порядка.

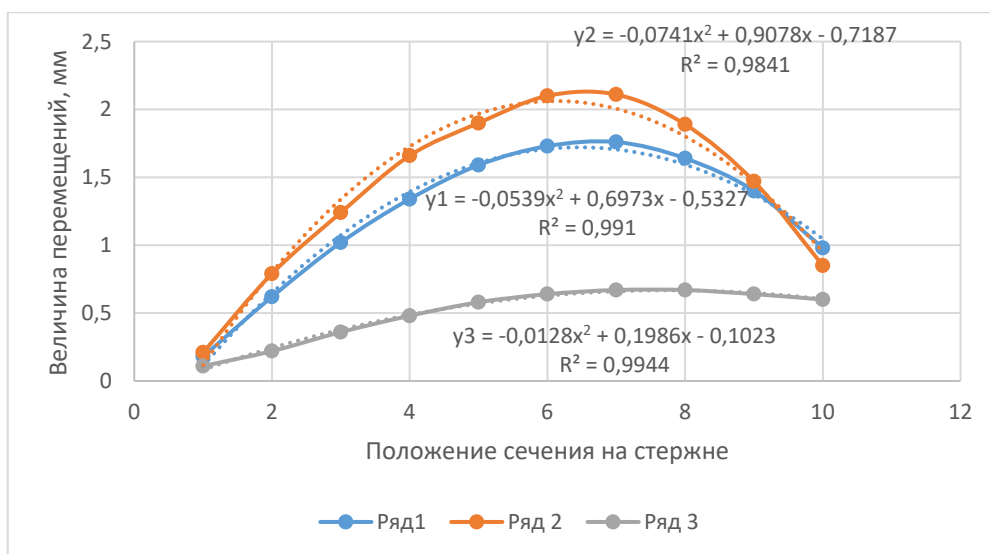


Рис. 9. Изменение перемещений по длине стержня 3 в точках поперечного сечения 1, 2, 3, 4, 5, 6
Fig. 9. Change in displacements along the length of rod 3 at cross-section points 1, 2, 3, 4, 5, 6

Эмпирические зависимости при коэффициенте рассеяния не менее 0,98 и до-

верительной вероятности 0,95 кривых (рис. 9) представлены в табл. 4.

Таблица 4

Зависимости изменения перемещений Δ , мм по длине стержней по сечениям

Table 4

Dependencies of the change in displacement Δ , mm along the length of the rods by sections

Номер стержня		
1	2	3
$-0,0539x^2 + 0,6973x - 0,5327$	$-0,0741x^2 + 0,9078x - 0,7187$	$-0,0128x^2 + 0,1986x - 0,1023$

На рис. 9 видно, что экстремум каждой функции лежит посередине каждого стержня, что соответствует выбранной за-

делке стержневых систем с отвалом опорой на поперечной балке [10].

Выводы

1. Расчеты усилий в рабочем оборудовании отвала, проведенные на основе 3D-моделирования позволили установить влияние распределенной нагрузки на отвале в случае набора полной призмы волочения на изменение усилий в штоках гидроцилиндров в момент потери ими устойчивости, являющейся причиной их отказов.

2. Анализ расчетов позволил выявить физическую природу нагруженности што-

ков гидроцилиндров в предлагаемой конструкции отвала бульдозеров и оценить ее количественно.

3. Изменение величины нагрузки на отвале позволит автоматизировать процесс управления секциями отвала для исключения превышения нагрузки на рабочее оборудование секций отвала.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сладкова Л.А., Щепалин Д.Е. Модернизация гидропривода усовершенствованного рабочего оборудования бульдозера. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2025. № 5. С. 334-341.
2. Положительное решение по заявке 2025110520 на патент. Рабочее оборудование бульдозера. / Авторы: Л.А. Сладкова, Д.Е. Щепалин, П.А. Григорьев. Дата подачи заявки 22.04.2025 г. Пол. решение 12.01.2026.
3. Положительное решение по заявке 20251125923 на патент. Рабочее оборудование бульдозера. / Авторы: Л.А. Сладкова, Д.Е. Щепалин, П.А. Григорьев, А.С. Бирюков. Дата подачи заявки 28.08.2025 г. Пол. решение 17.12.2025.
4. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В. И. Баловнев. М. : Машиностроение, 1994. 328с.
5. Сладкова Л.А., Щепалин Д.Е., Бирюков А.С. Методика проведения экспериментальных исследований рабочего оборудования бульдозера с выдвижными секциями. // Известия Тульского

- государственного университета. Технические науки. 2025. № 10. С. 258-266.
6. Старостина Ж.А., Морозов Р.В. Расчет конструкций методом конечных элементов с использованием приложения APM FEM : учебно-методическое пособие / Ж.А. Старостина, Р.В. Морозов. М. : МАДИ, 2022. 100 с.
7. APM FEM. Версия для КОМПАС-3D v19 : руководство пользователя [Электронный ресурс] / ООО НТЦ «АПИМ». – Королев (Московская область), 2020. – Режим доступа: <https://www.apm.ru/downloads/188/APM-FEM.pdf> (дата обращения: 24.01.2026).
8. Справочник конструктора дорожных машин / под ред. И. П. Бородачева, канд. техн. наук. М.: Машиностроение, 1965. 365 с.
9. Гоберман Л. А. Основы теории, расчёта и проектирования строительных и дорожных машин / Л. А. Гоберман. М. : Машиностроение, 1988. 463 с.
10. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов : учебник для втузов / В. И. Феодосьев. 9-е изд., перераб. М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 512 с.

REFERENCES

1. Sladkova LA, Shchepalin DE. Modernization of the hydraulic drive of the improved working equipment of the bulldozer. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2025;5:334-341.
2. Sladkova LA, Shchepalin DE, Grigoriev PA. Positive decision on the patent application 2025110520. Working equipment of the bulldozer. 12 Jan 2026.
3. Sladkova LA, Shchepalin DE, Grigoriev PA, Biryukov AS. Positive decision on the patent application 20251125923. Working equipment of the bulldozer. 17 Dec 2025.
4. Balovnev VI. Modeling of interaction of operation bodies of road construction machinery with the environment. Moscow: Mashinostroenie; 1994.
5. Sladkova LA, Shchepalin DE, Biryukov AS. Methods of experimental studies of bulldozer working equipment with retractable sections. *Izvestiya TulGU. Technical Sciences*. 2025;10:258-266.
6. Starostina ZhA, Morozov RV. Calculation of structures by the finite element method using APM FEM applications: textbook. Moscow: MADI; 2022.
7. APM FEM. Version for COMPASS-3D v19: user's guide [Internet]. Korolev; 2020 [cited 2026 Jan 24]. Available from: <https://www.apm.ru/downloads/188/APM-FEM.pdf>.
8. Borodachev IP, editor. Handbook of the designer of road machines. Moscow: Mashinostroenie; 1965.
9. Goberman LA. Fundamentals of theory, calculation and design of construction and road machines. Moscow: Mashinostroenie; 1988.
10. Feodosyev VI. Resistance of materials: textbook for higher education institutions. 9th ed. Moscow: Nauka; 1986.

Информация об авторах:

Сладкова Любовь Александровна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта, тел.+7(965) 377-93-89.

Sladkova Lyubov Aleksandrovna – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Ground Transportation and Technological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(965) 377-93-89.

Щепалин Даниил Евгеньевич – аспирант кафедры «Наземные транспортно-технологические средства», Российский университет транспорта, тел.+7(920) 622-18-43.

Shchepalin Daniil Evgenievich – Postgraduate Student of the Department of Ground Transport and Technological Facilities, Russian University of Transport, phone: +7(920) 622-18-43.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья опубликована в режиме Open Access.
Article published in Open Access mode.

Статья поступила в редакцию 11.02.2026; одобрена после рецензирования 03.06.2026; принята к публикации 26.06.2026. Рецензент – Антипин Д.Я., кандидат технических наук, доцент кафедры «Подвижной состав железных дорог», директор учебно-научного института транспорта Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 11.02.2026; approved after review on 03.06.2026; accepted for publication on 26.06.2026. The reviewer is Antipin D.Ya., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Railway Rolling Stock, Director of the Educational and Scientific Institute of Transport at Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.