

Научная статья
УДК 629.369

Экспериментальное исследование нагруженности подвески самоходного модульного транспортного средства

Михаил Александрович Пузров¹, Алексей Вадимович Мидаков²,
Сергей Львович Тропин³, Александр Николаевич Мисинев⁴

^{1,3}МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия

⁴ООО «ОКБ «Спецтяжпроект», Москва, Россия

¹puzrovma@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9986-5535>

²aleksei_midakov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3879-6839>

³tropin@spectyazh.ru

⁴misinev.alexandr@okb-om.ru

Аннотация. В статье представлены результаты натурного эксперимента по исследованию напряженно-деформированного состояния подвески самоходного модульного транспортного средства (СМТС) при подъеме и опускании груза с помощью метода электрической тензометрии. Целью исследования являлось установление зависимости напряженно-деформированного состояния подвески от нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям и вертикального перемещения платформы СМТС. Полученные зависимости изменения напряжений от вертикального перемещения платформы СМТС и нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям составляют научную новизну исследования. Практическая значимость работы заключается в том, что представленную в статье информацию можно использовать при проектировании элементов подвески самоходного модульного транспортера и создании отечественных аналогов СМТС.

Ключевые слова: самоходный модульный транспортер, гидравлическая подвеска, тензодатчик, напряженно-деформированное состояние.

Для цитирования: Пузров М.А., Мидаков А.В., Тропин С.Л., Мисинев А.Н. Экспериментальное исследование нагруженности подвески самоходного модульного транспортного средства // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2025. № 2 (44).

Original article

Experimental study of suspension loading of self-propelled modular transporter

Mikhail A. Puzrov¹, Aleksei V. Midakov², Sergey L. Tropin³, Alexander N. Misinev⁴

^{1,3}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russia

⁴ООО “ОКБ “Spectyazhproekt”, Moscow, Russia

¹puzrovma@student.bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9986-5535>

²aleksei_midakov@rambler.ru, <https://orcid.org/0009-0001-3879-6839>

³tropin@spectyazh.ru

⁴misinev.alexandr@okb-om.ru

Abstract. The article presents the results of a full-scale experiment on the study of the stress-strain state of the suspension of a self-propelled modular transporter (SPMT) when lifting and lowering a load using the method of electrical strain gauge. The aim of the study was to establish the dependence of the stress-strain state of the suspension on the load on the supporting surface along the axial lines and the vertical movement of the SPMT platform. The obtained dependencies of the change in stresses on the vertical movement of the SPMT platform and the load on the supporting surface along the axial lines constitute the scientific novelty of the study. The practical significance of the work lies in the fact that the information presented in the article can be used in the design of suspension elements of a self-propelled modular transporter and the creation of domestic analogues of SPMT.

Keywords: self-propelled modular transporter, hydraulic suspension, strain gauges, stress-strain state.

For citation: Puzrov M.A., Midakov A.V., Tropin S.L., Misinev A.N. Experimental study of suspension loading of self-propelled modular transporter. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2025. № 2 (44).

Введение

Самоходный модульный транспортер – это платформенное подъемно-транспортное средство, состоящее из отдельных модулей, каждый из которых может быть оснащен собственным двигателем и системой

управления, а также имеет возможность поперечной и продольной стыковки с другими модулями с целью формирования СМТС требуемой конфигурации. Как правило, конфигурация СМТС определяется габаритами и массой груза, прочностью рамы модульного транспортера, допустимыми осевыми нагрузками на опорную поверхность и т.д. [1]. Весомым преимуществом по сравнению с самоходной прицепной техникой является то, что для приведения СМТС в движение не используются тягачи, а тяговое усилие создается колесными редукторами, имеющими гидропривод.

СМТС используются для транспортировки крупногабаритных и тяжеловесных грузов (КТГ). Масса перевозимых с помощью СМТС грузов может варьироваться от нескольких десятков тонн до нескольких тысяч тонн, а габариты грузов обычно составляют от нескольких метров до десятка метров, при этом некоторые перевозимые с помощью СМТС конструкции достигают в длину сотни метров [2].

СМТС обычно оснащаются гидравлической подвеской, которая помимо преодоления неровностей опорной поверхности позволяет выполнять погрузочно-разгрузочные работы (ПРР) с КТГ бескрановым методом за счет относительно большого вертикального хода подвески ($\pm 300\text{--}350$ мм относительно транспортного положения) и опирания груза, выступающего за габариты СМТС, на временные опоры (так называемые «тумбы»).

Подвеска СМТС является одним из наиболее ответственных узлов конструкции модульного транспортера, которая влияет на безопасность движения [3]. При этом условия эксплуатации СМТС существенно влияют на безотказность конструкции модульного транспортера и на срок службы элементов гидравлической подвески. В работе [4] показано, что нижний рычаг подвески может сломаться с обеих сторон (рис. 1), что оказывает

серьезное влияние на безопасность эксплуатации СМТС и затраты транспортной компании.



Рис. 1. Сломанный нижний рычаг подвески СМТС [4]

Однако исследований безотказности деталей СМТС сравнительно мало [4-7]. Методики определения нагруженности подвески СМТС отсутствуют в открытом доступе. Поэтому было принято решение провести исследование напряженно-деформированного состояния элементов подвески СМТС.

Основная часть

Перед проведением исследования была проведена комплексная подготовка. В первую очередь была определена цель проведения исследования и задачи, которые предстоит выполнить в соответствии с этой целью. В данном случае, целью исследования являлось установление зависимости напряженно-деформированного состояния подвески от нагрузки на осевую линию и вертикального перемещения платформы СМТС.

Объектом исследования являлась подвеска СМТС с 4 осевыми линиями, которая находится с левой стороны модуля и относится к осевой линии №2, как показано на рис. 2. Предмет исследования – это напряженно-деформированное состояние подвески СМТС с приводной осью.

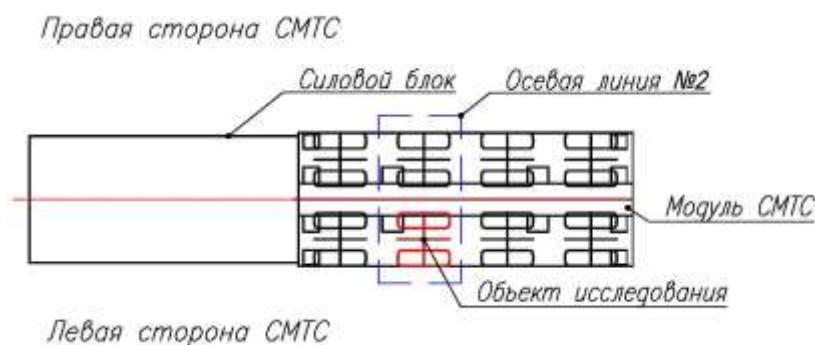


Рис. 2. Схема модуля СМТС с силовым блоком (вид сверху)

Выбор мест для установки контрольного оборудования в заданное положение осуществлялся на основании ранее проведенного методом конечных элементов анализа напряженно-деформированного состояния подвески СМТС с приводной осью и определения направлений главных напряжений [8].

Выбор оптимальных измерительных приборов определялся по итогам предварительного тестового осмотра СМТС. Осмотр и исследование проводились в соответствии с требованиями по технике безопасности, указанными в инструкции по эксплуатации СМТС, на площадке с твердым покрытием, обеспечивающим требуемую прочность и безопасность проведения работ в следующих климатических условиях: атмосферное давление 763 мм рт. ст.; температура воздуха +21°C; влажность 41%.

С целью определения фактических нагрузок, действующих на каждую осевую линию модуля СМТС, перед проведением эксперимента было выполнено взвешивание СМТС с помощью поверенных автомобильных стационарных весов платформенного типа.

Одна из особенностей проведения эксперимента заключалась в том, что масса балласта (19.85 тонн) не менялась, а изменение нагрузки на осевую линию производилось за счет вывешивания осевых линий №1 и №3, что не потребовало использование крана или других подъемно-транспортных средств. Масса модуля СМТС составляла 19.1 тонн, силового блока – 7.5 тонн, таким образом, полная масса испытываемого СМТС, полностью заправленного топливом, маслом, специальными жидкостями,

оборудованного запасными частями, инструментами и принадлежностями, составляла 46.45 тонн.

Для измерения напряжений использовались интеллектуальные тензодатчики с цифровым измерительным модулем ZET 7010 и интерфейсом RS-485 в режиме реального времени. Лазерный дальномер DIMETIX FLS-S10 использовался для измерения вертикального перемещения платформы СМТС в составе компьютерной измерительной системы «КИС-М» [9].

Используемое измерительное оборудование при проведении эксперимента было признано годным для эксплуатации, что подтверждалось соответствующими сертификатами и свидетельствами о поверке средств измерений.

Оценка нагруженности приводной оси СМТС выполнялась с учетом подъема и опускания платформы СМТС с различной нагрузкой на осевую линию в следующей последовательности:

1. Ознакомление с предоставленной технической документацией и проверка готовности оборудования к проведению исследования.
2. Установка контрольного оборудования в заданное положение точек на подвеске СМТС с приводной осью (см. рис. 3).

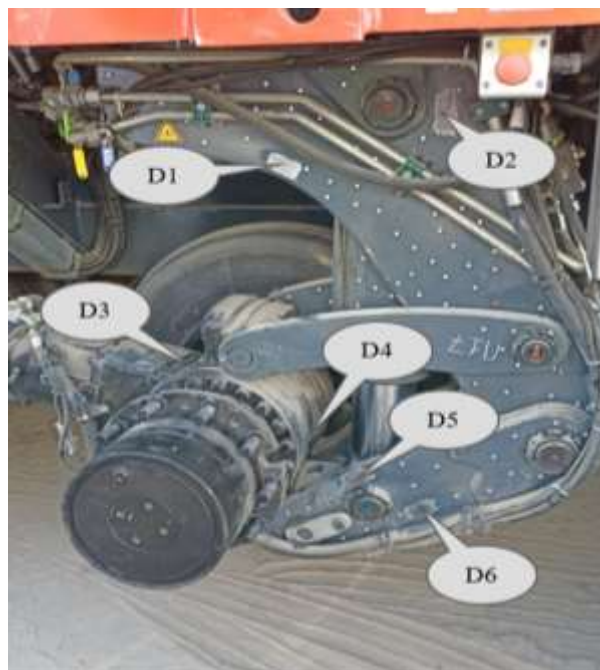


Рис. 3. Положение точек для установки датчиков

3. Проведение измерений с помощью установленного контрольного оборудования на подвеске СМТС с приводной осью при подъеме и опускании груза с учетом различного распределения нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям, как показано на рис. 4:

- 3.1. при опоре на все четыре осевые линии (см. рис. 4а);
- 3.2. с одной вывешенной осевой линией (см. рис. 4б);
- 3.3. с двумя вывешенными осевыми линиями (см. рис. 4в).

4. Снятие контрольного оборудования и обработка результатов измерений.

Непосредственно на объекте исследования использовались только два измерительных модуля ZET 7010 одновременно, к которым были подключены по два тензодатчика (основной тензодатчик устанавливался по направлению главных напряжений, и запасной тензодатчик устанавливался рядом для контроля показаний основного датчика).

Также с целью ускорения времени проведения эксперимента измерения для всех точек D1-D6 проводились при опоре на все четыре осевые линии и при вывешенной осевой линии №3. В точках D3 и D4 для датчиков, установленных на корпусе приводной оси, проводилось дополнительное испытание при вывешенных осевых линиях №1 и №3 для проверки приводной оси с учетом максимально допустимой для нее нагрузки.

В начале каждого этапа испытаний показания всех приборов устанавливались в ноль для контроля величин изменения показаний.

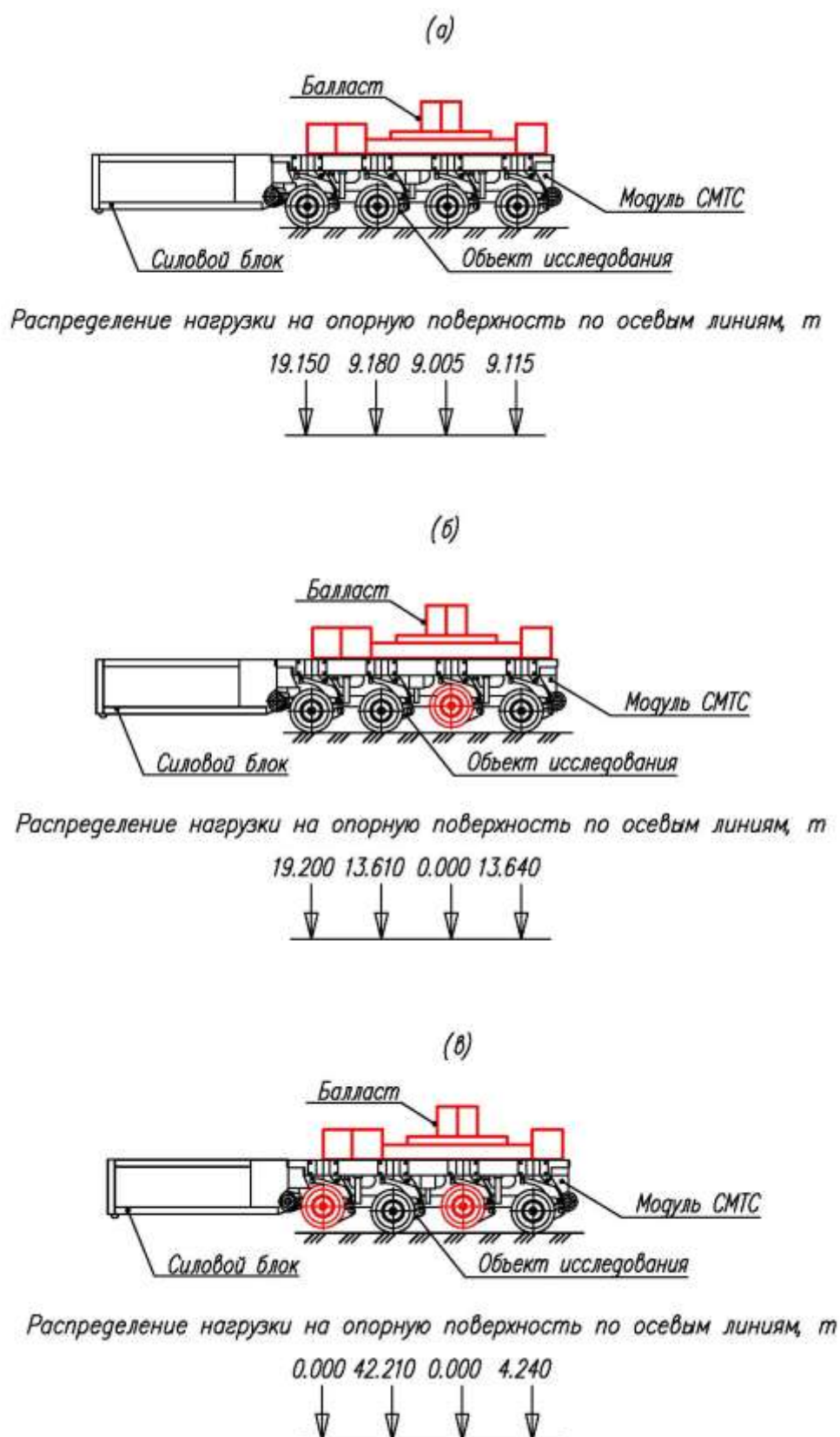


Рис. 4. Распределение нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям

Результаты

На рисунке 5 показаны графики изменения напряжений в точках D1-D6 исследуемой подвески. На рис. 5а видно, что напряжения в местах установки датчиков D1 и D2 изменяются неравномерно: при подъёме платформы на 300 мм напряжения меняются слабо. Более значительное изменение напряжения происходит в момент подъёма платформы на 400–600 мм. При вывешенной осевой линии №3 (на графиках данный этап показан обозначением «1»)) наблюдается более сильное изменение напряжений на начальном этапе подъема груза (от 0 до 400 мм), а при подъёме на 600 мм наблюдается схожий уровень изменения напряжений по сравнению с данными, полученными при опоре СМТС на все четыре осевые линии (на графиках данный этап показан обозначением «Все оси»). Максимальное изменение напряжений в точках D1 и D2 не превысило 20 МПа.

График изменения напряжений в местах установки датчиков D3 и D4 при опоре на все четыре осевые линии («Все оси»), при режиме «1» – вывешенной осевой линии №3 и при режиме «2» – вывешенных осевых линиях №№ 1 и 3 показан на рис. 5б. В первых двух режимах («Все оси» и «1»)) напряжения менялись по похожему сценарию. В третьем, самом нагруженном режиме, напряжения оказались не только самыми большими, но и поменяли знак, однако не превысили 5 МПа.

График изменения напряжений в местах установки датчиков D5 и D6 при опоре на все четыре осевые линии («Все оси») и при вывешенной осевой линии №3 (режим «1»)) показан на рисунке 5в.

Изменение напряжений в местах установки датчиков D5 и D6 при опоре на все четыре осевые линии ведут себя вполне предсказуемо, но на максимальной высоте напряжения резко уменьшились. А при подъёме с вывешенной осевой линией №3 знаки напряжений в контролируемых точках

изменились на противоположные. Максимальное изменение напряжений в точках D5 и D6 не превысило 26 МПа.

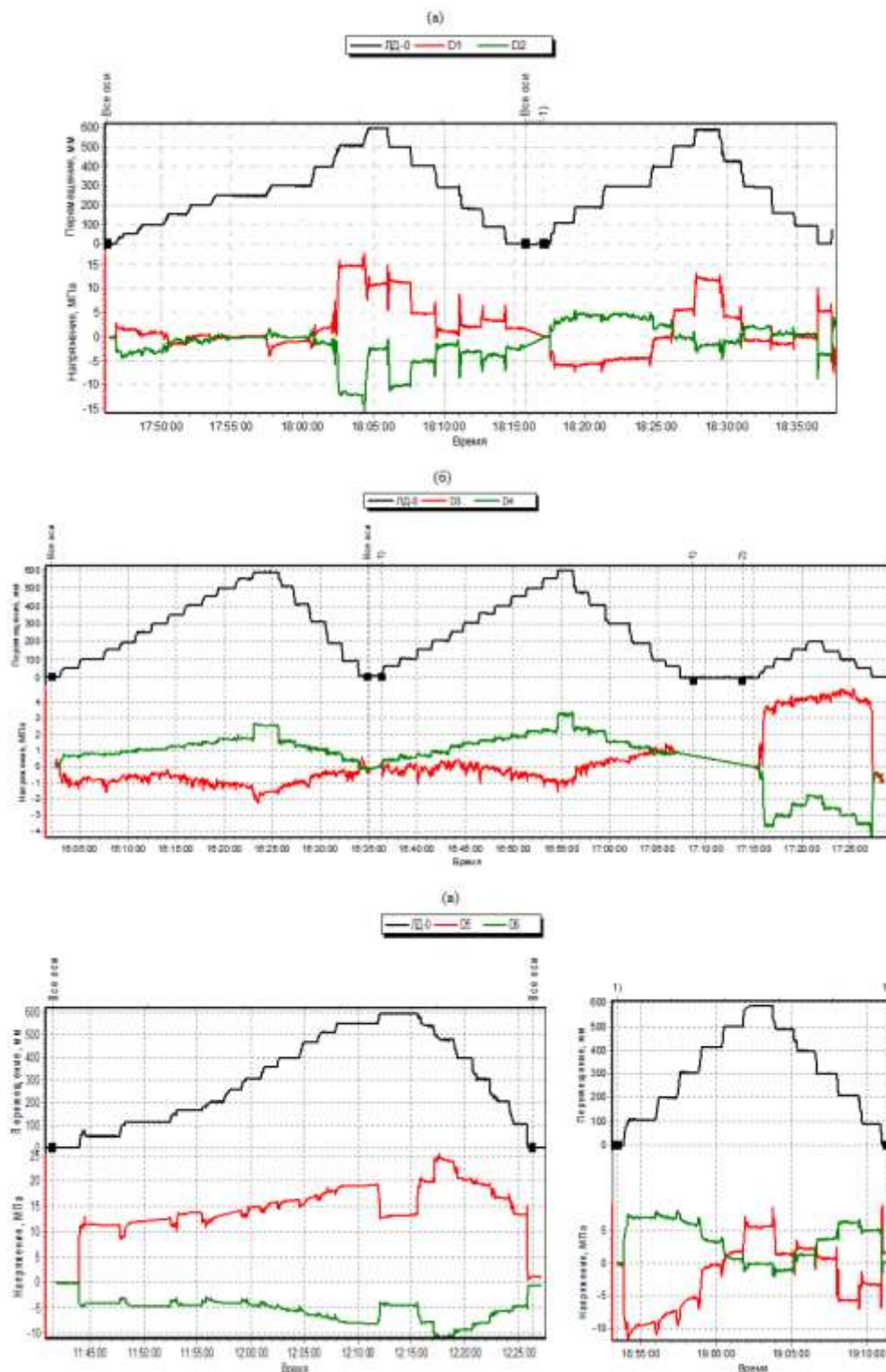


Рис. 5. Графики изменения напряжений в точках D1-D6

После обработки и проведения регрессионного анализа данных эксперимента были получены зависимости изменения напряжений от вертикального перемещения платформы (от 0 до 600 мм) и нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям (от 9.18 до 42.21 тонн) для точек D1-D6 исследуемой подвески СМТС (1–6):

$$D1 = 0.017 \times H - 0.593 \times G + 4.502 \quad (1)$$

$$D2 = -0.006 \times H + 0.902 \times G - 10.007 \quad (2)$$

$$D3 = -0.001 \times H + 0.112 \times G - 1.435 \quad (3)$$

$$D4 = 0.004 \times H - 0.086 \times G + 1.149 \quad (4)$$

$$D5 = 0.018 \times H - 3.507 \times G + 41.566 \quad (5)$$

$$D6 = -0.008 \times H + 1.843 \times G - 19.998 \quad (6)$$

где H – вертикальное перемещение платформы, мм;

G – нагрузка на опорную поверхность по осевым линиям, тонн;

$D1-D6$ – изменение напряжений в соответствующих точках подвески СМТС с приводной осью, МПа.

Регрессионная статистика по итогам проведенного анализа данных представлена в табл. 1, из которой видно, что R -квадрат (коэффициент детерминации) для уравнений (1–2) составил менее 0.50, что говорит о слабой точности аппроксимации и необходимости проведения дальнейших исследований напряженно-деформированного состояния в данном элементе подвески СМТС. Для уравнений (3–6) R -квадрат находится в диапазоне от 0.72 до 0.83, что говорит о хорошей точности аппроксимации. Значимость F (критерий Фишера) не превышает 0.05 (5E-2), что говорит о достоверности результатов исследования и значимости представленных моделей.

Таблица 1

Регрессионная статистика по итогам проведенного анализа данных

Параметр	Значения параметров для уравнений (1–6)					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Множественный R	0.67	0.61	0.85	0.90	0.91	0.90
R–квадрат	0.44	0.38	0.72	0.82	0.83	0.80
Нормированный R–квадрат	0.40	0.33	0.71	0.81	0.82	0.79
Стандартная ошибка	3.95	3.01	0.93	0.72	3.99	2.26
Количество наблюдений	28	28	46	46	33	33
Значимость F	6.7E–4	2.7E–3	9.2E–13	1.3E–16	2.6E–12	2.9E–11

Выводы

С целью установления зависимости напряженно-деформированного состояния подвески СМТС от нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям и вертикального перемещения платформы СМТС было проведено экспериментальное исследование нагруженности подвески на натурном образце СМТС с помощью метода электрической тензометрии.

Одна из особенностей проведения исследования заключалась в том, что изменение нагрузки на исследуемую осевую линию производилось с помощью вывешивания соседних осевых линий СМТС без использования других подъемно-транспортных средств и без изменения массы балласта.

По результатам обработки полученных данных было установлено, что максимальные изменения напряжений в точках D1 и D2 не превысили 20 МПа; в точках D3 и D4 составили менее 5 МПа; точках D5 и D6 не превысили 26 МПа, что составляет менее 4% от предела текучести материалов, из которых изготовлены исследуемые детали подвески СМТС с приводной осью.

После проведения регрессионного анализа данных эксперимента были получены зависимости изменения напряжений от вертикального

перемещения платформы (от 0 до 600 мм) и нагрузки на опорную поверхность по осевым линиям (от 9.18 до 42.21 тонн) для точек D3-D6 исследуемой подвески СМТС, что позволяет в дальнейшем прогнозировать изменение напряжений в данных точках подвески СМТС с приводной осью и использовать полученные значения напряжений при проектировании элементов подвески самоходного модульного транспортера и создании отечественных аналогов СМТС.

При наличии дополнительных измерительных модулей и большего количества тензодатчиков, можно провести более комплексное исследование напряженно-деформированного состояния конструкции подвески СМТС, а также существенно сократить время проведения эксперимента.

Список источников

1. Варламов, Л. А. Анализ существующих схем подвесок самоходных модульных транспортных средств с электронным управлением поворотом осей (серии «MSPE») компании «Cometto» / Л. А. Варламов, М. А. Пузров // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 1. – С. 53-64. – EDN YIODAE.
2. Белоусов, Б. Н. Колесные транспортные средства особо большой грузоподъемности / Б. Н. Белоусов, С. Д. Попов. – Москва : Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2006. – 728 с. – ISBN 5-7038-2713-2. – EDN ZCLDRB.
3. Аксенов, П. В. Многоосные автомобили / П. В. Аксенов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1989. – 278 с.
4. Durability Analysis on Hydraulic Suspension System of Modular Assembled Trailer / T. D. Vu, D. W. Dong, B. Yan, C. R. Hua, Q. Y. Tu // Applied Mechanics and Materials. – 2011. – Vol. 105-107. – P. 227-232.
5. Тропин, С. Л. Методика расчета прочности рамы специализированных транспортных модулей при перевозке крупногабаритных тяжеловесных грузов / С. Л. Тропин, И. К. Свечников, А. Н. Мисинев // Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация. – 2023. – № 1. – С. 1-16. – EDN EVYHJF.
6. Compliance of Self-adaption Suspension Group Systems in Selfpropelled Transporters / J.Y. Zhao, S.P. Kang, F. Cheng, L.Z. Fan / Chin. Mech. Eng. – 2016. – Vol. 27. – P. 3103-3110. – DOI 10.3969/j.issn.1004-132X.2016.22.021.

7. Gui, Z. An Analysis on the Effects of Road Roughness on Multi-Axle Vehicle with Hydraulic Suspension / Z. Gui, F. Han, H.S. Zhang // *Automob. Eng.* – 2010. – Vol. 32. – P. 155-158.
8. Пузров, М. А. Оценка нагруженности подвески самоходного модульного транспортного средства методом конечных элементов / М. А. Пузров, А. В. Мидаков // *Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта : Сборник статей V Всероссийской научно-практической конференции, Екатеринбург, 15 декабря 2023 года.* – Екатеринбург: Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2024. – С. 118-122. – EDN KXHMXX.
9. Васильев, А. И. Мониторинг технического состояния мостовых сооружений : Учебное пособие / А. И. Васильев. – Москва : Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), 2021. – 120 с. – EDN YNSWFT.

References

1. Varlamov L.A., Puzrov M.A. *Mashiny i ustanovki: projektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2023, no. 1, pp. 53-64.
2. Belousov B.N., Popov S.D. *Kolesnye transportnye sredstva osobo bol'shoj gruzopod'emnosti* (Wheeled vehicles of particularly high load capacity), Moscow, *MGTU im. N.E. Bauman*, 2006, 728 p.
3. Aksenov P.V. *Mnogoosnye avtomobili* (Multi-axle vehicles), Moscow, *Mashinostroenie*, 1989, 278 p.
4. Vu T.D., Dong D.W., Yan B., Hua C.R., Tu Q.Y. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, vol. 105-107, pp. 227-232.
5. Tropin S.L., Svechnikov I.K., Misinev A.N. *Mashiny i ustanovki: projektirovanie, razrabotka i ekspluatatsiya*, 2023, no. 1, pp. 1-16.
6. Zhao J.Y., Kang S.P., Cheng F., Fan L.Z. *Chin. Mech. Eng.*, 2016, vol. 27, pp. 3103–3110.
7. Gui Z., Han F., Zhang H.S. *Automob. Eng.*, 2010, vol. 32, pp. 155–158.
8. Puzrov M.A., Midakov A.V. *Innovatsionnoye razvitiye tekhniki i tekhnologiy nazemnogo transporta*, *Sbornik statey*, Yekaterinburg: Ural'skiy federal'nyy universitet im. pervogo Prezidenta Rossii B.N. Yel'tsina, 2024, pp. 118-122.
9. Vasil'ev A.I. *Monitoring tekhnicheskogo sostoyaniya mostovykh sooruzhenij* (Monitoring the technical condition of bridge structures), Moscow, *MADI*, 2021, 120 p.

Рецензент: А.Г. Савельев, д-р техн. наук, генеральный директор, ООО «Русский Сертификационный Центр»

Информация об авторах

Пузров Михаил Александрович, аспирант, МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Мидаков Алексей Вадимович, аспирант, ИМАШ РАН.

Тропин Сергей Львович, канд. техн. наук, заведующий каф.

«Подъемно-транспортные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Мисинев Александр Николаевич, канд. техн. наук, технический директор,
ООО «ОКБ «Спецтяжпроект».

Information about the authors

Puzrov Mikhail A., postgraduate, BMSTU.

Midakov Aleksei V., postgraduate, IMASH RAN.

Tropin Sergey L., Candidate of Sciences (Technical), Head of the department
"Lifting and transport systems", BMSTU.

Misinev Alexander N., Candidate of Sciences (Technical), Technical Director,
ООО "OKB "Spectyazhproekt".

Статья поступила в редакцию 26.02.2025; одобрена после рецензирования 06.05.2025; принята к публикации 06.06.2025.

The article was submitted 26.02.2025; approved after reviewing 06.05.2025; accepted for publication 06.06.2025.