

УДК 629.4.027.4:539.431

Оценка прочности главной рамы локомотива ТЭМ2 при воздействии статических и ударных нагрузок

П. С. Григорьев, Н. С. Кодиров, О. Бат-Эрдене

Российский университет транспорта, Российская Федерация, 127994, Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

Для цитирования: Григорьев П. С., Кодиров Н. С., Бат-Эрдене О. Оценка прочности главной рамы локомотива ТЭМ2 при воздействии статических и ударных нагрузок // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2025. — Т. 22. — Вып. 2. — С. 395–406. DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-395-406

Аннотация

Цель: В данной работе представлены анализ прочности и оценка ресурса главной рамы маневрового тепловоза ТЭМ2, выполненные в соответствии с нормативными требованиями. Исследование направлено на определение напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции под действием статических и ударных нагрузок, а также на проверку соответствия регламентирующим документам, учитывая истекший срок службы данных локомотивов. **Методы:** Для достижения поставленной цели были решены задачи, включающие проведение конечно-элементного анализа, моделирование нагружения рамы с учетом развески и расположения масс оборудования, а также исследование состояния конструкции при расчетных режимах нагружения. Отдельно уделено внимание рассмотрению малоциклового усталости и ее влиянию на долговечность главной рамы тепловоза ТЭМ2. **Результаты:** Позволили оценить текущее состояние несущей конструкции, выявить критические зоны и разработать рекомендации по продлению остаточного ресурса тепловоза. **Практическая значимость:** Выполненное исследование позволило определить напряженно-деформированное состояние главной рамы тепловоза ТЭМ2 в расчетных режимах нагружения. Это представляет значительный интерес для обеспечения безопасности и надежности подвижного состава, в частности маневровых локомотивов. Полученные данные согласуются с требованиями, и полученные результаты могут быть полезны для совершенствования требований к прочностным расчетам конструкций маневровых локомотивов, а также при определении расчетных нагрузок для оценки ресурса несущих конструкций.

Ключевые слова: Главная рама тепловоза, маневровый локомотив ТЭМ2, напряженно-деформированное состояние, оценка остаточного ресурса, малоцикловая усталость, прочность несущих конструкций, конечно-элементный анализ.

Введение

В условиях активной эксплуатации маневровых тепловозов ТЭМ2 на железных дорогах Республики Узбекистан, где средний возраст парка превышает 30 лет, проблема старения несущих конструкций приобретает особую остроту [1]. Продолжительная эксплуатация несущих конструкций локомотивов, включая главную раму, кузов, шкворневые узлы и рамы тележек, вызы-

вает постепенное ухудшение их механических характеристик из-за знакопеременных циклических нагрузок, которые провоцируют усталость материала на микроструктурном уровне. Эти нагрузки способствуют формированию локальных зон с последующим развитием трещин и снижением несущей способности. В итоге прочностные свойства конструкции деградируют, а ее ресурс эксплуатации уменьшается. Актуаль-

ность исследования обусловлена ролью главной рамы тепловоза ТЭМ2 как ключевого несущего элемента, определяющего безопасность и надежность эксплуатации. Несмотря на превышение нормативного срока службы локомотивов, прочностные характеристики рамы, подтвержденные критериями усталостной прочности, обосновывают целесообразность ее дальнейшего использования. В то же время как критический элемент несущей конструкции главная рама требует обязательной оценки прочности в соответствии с действующими локомотивными стандартами и нормативными документами [2, 3].

В работах [4, 5] акцентировано внимание на особенностях эксплуатации маневровых тепловозов, при которой главная рама подвергается значительным продольным нагрузкам — как статическим, так и динамическим, причем число их повторений относительно невелико. Интересно, что в процессе такого нагружения в отдельных участках главной рамы локомотива возникают напряжения, сравнимые или превышающие предел текучести стали, что вызывает локальные остаточные деформации, нарушающие геометрию несущих элементов. Это требует специальных подходов к оценке ресурса конструкции, учитывающих уровень напряжений и их влияние на накопление повреждений для обеспечения долговечности [6–9].

В условиях эксплуатационных воздействий расчет остаточного ресурса конструкции требует применения деформационных критериев малоциклового усталости, основанных на анализе упрочняющих характеристик материала и их исчерпания при циклическом нагружении с высокой амплитудой деформаций. Для прогнозирования долговечности конструкции используется уравнение Мэнсона — Коффина, устанавливающее количественную связь между амплитудой пластической деформации и числом циклов до разрушения [10, 11]. Применение этой модели является

весьма обоснованным при расчете напряженно-деформированного состояния несущих сварных конструкций локомотивных рам, в которых зоны концентрации напряжений испытывают значительные пластические деформации.

Согласно исследованиям Н. А. Махутова и Э. С. Оганьяна [4–6], малоцикловая усталость главной рамы тепловоза рассматривается как один из ключевых факторов, определяющих долговечность несущих элементов при действии переменных нагрузок. Малоцикловое разрушение, обусловленное образованием и развитием микротрещин, снижает прочностные характеристики материала, а расчет ресурса по критерию малоциклового усталости определяет предельное число циклов нагружения, после которого возможны трещины или разрушение конструкции.

Корректная оценка технического состояния несущих конструкций локомотива, включая прогнозирование остаточного ресурса главной рамы и обеспечение безопасности эксплуатации за счет сохранения прочности шкворневых и сварных узлов, требует расчетно-экспериментальных подходов, использующих метод конечных элементов для анализа напряженно-деформированного состояния в условиях реальных нагрузок. Этот метод эффективно моделирует деформации и распределение напряжений в сложных пространственных структурах.

В ходе настоящего исследования на основе метода конечных элементов была построена расчетная модель главной рамы тепловоза ТЭМ2. Основное внимание уделялось оценке прочностных характеристик и прогнозированию ее долговечности при воздействии нормативных продольных и вертикальных нагрузок, что особенно актуально для условий эксплуатации маневровых локомотивов.

Основной целью работы является анализ прочности и оценки остаточного ресурса главной рамы тепловоза ТЭМ2 при воздействии стати-

ческих и ударных нагрузках согласно соответствующим требованиям [2, 3]. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выполнить моделирование главной рамы маневрового тепловоза ТЭМ2 с использованием методов численного анализа,
- задать нагружение модели согласно развеске, расположению масс установленного на раме оборудования и от действия продольных сил сжатия по осям автосцепок;
- выполнить анализ напряженно-деформированного состояния конструкции главной рамы тепловоза при расчетных режимах согласно [2, 3];
- выполнить оценку результатов расчета на соответствие требованиям [2, 3];
- оценит ресурс главной рамы тепловоза при малоцикловом нагружении.

Материалы и методы

Объектом исследования является главная рама маневрового тепловоза ТЭМ2 (рис. 1), выполненная в виде сварной пространственной конструкции, обеспечивающей установку силового и вспомогательного оборудования, а также передачу тяговых и тормозных усилий через автосцепное устройство. Несущую основу конструкции формируют две продольные балки двутаврового сечения (хребтовые балки), усиленные дополнительными стальными накладками шириной 320 мм и толщиной 22 мм, приваренными к поясам.

Продольные балки объединяются поперечными связями, в частности коробчатыми свар-

ными балками в областях крепления шкворней и опорно-возвращающих устройств, что увеличивает жесткость конструкции в горизонтальной плоскости. Концы продольных элементов жестко соединены литыми стяжными ящиками, что способствует повышению устойчивости рамы при действии продольных ударных нагрузок.

По боковым граням конструкции размещены обносные швеллеры, фиксируемые к хребтовым балкам посредством штампованных кронштейнов, что позволяет повысить ее изгибную прочность. Нагрузки от собственного веса рамы и установленных агрегатов передаются на две трехосные челюстные тележки через опорно-возвращающие устройства, моделирующие условия работы второго уровня рессорного подвешивания.

В соответствии с требованиями нормативного документа [3] прочность несущих элементов экипажной части тепловоза ТЭМ2 оценивают по допускаемым напряжениям по отношению к пределу текучести материала $\sigma_{0,2}$ по формуле:

$$\sigma_{\text{верт}} + \sigma_{\text{уд}} \leq 0,9\sigma_{0,2}, \quad (1)$$

где $\sigma_{\text{верт}}$ — напряжения от вертикальной нагрузки на главную раму (собственный вес конструкции + вес оборудования);

$\sigma_{\text{уд}}$ — напряжения от действия удара силой 2500 кН.

Нагружение модели главной рамы тепловоза массами узлов и агрегатов выполнено на основе монтажной схемы расположения оборудования (рис. 2) и упрощенной ведомости развески оборуду-

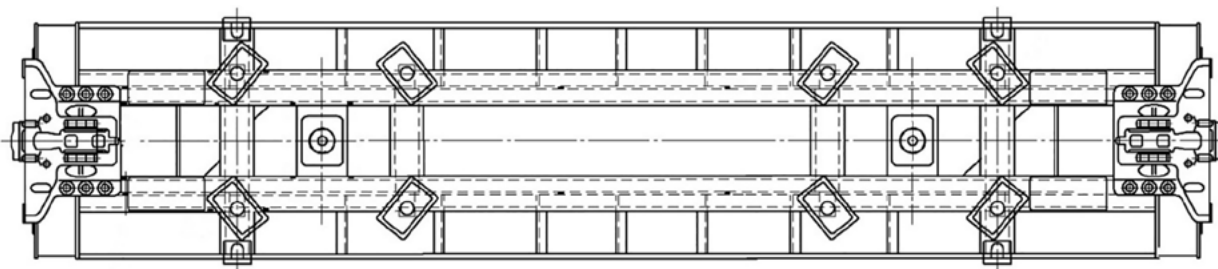


Рис. 1. Главная рама тепловоза ТЭМ2 вид снизу

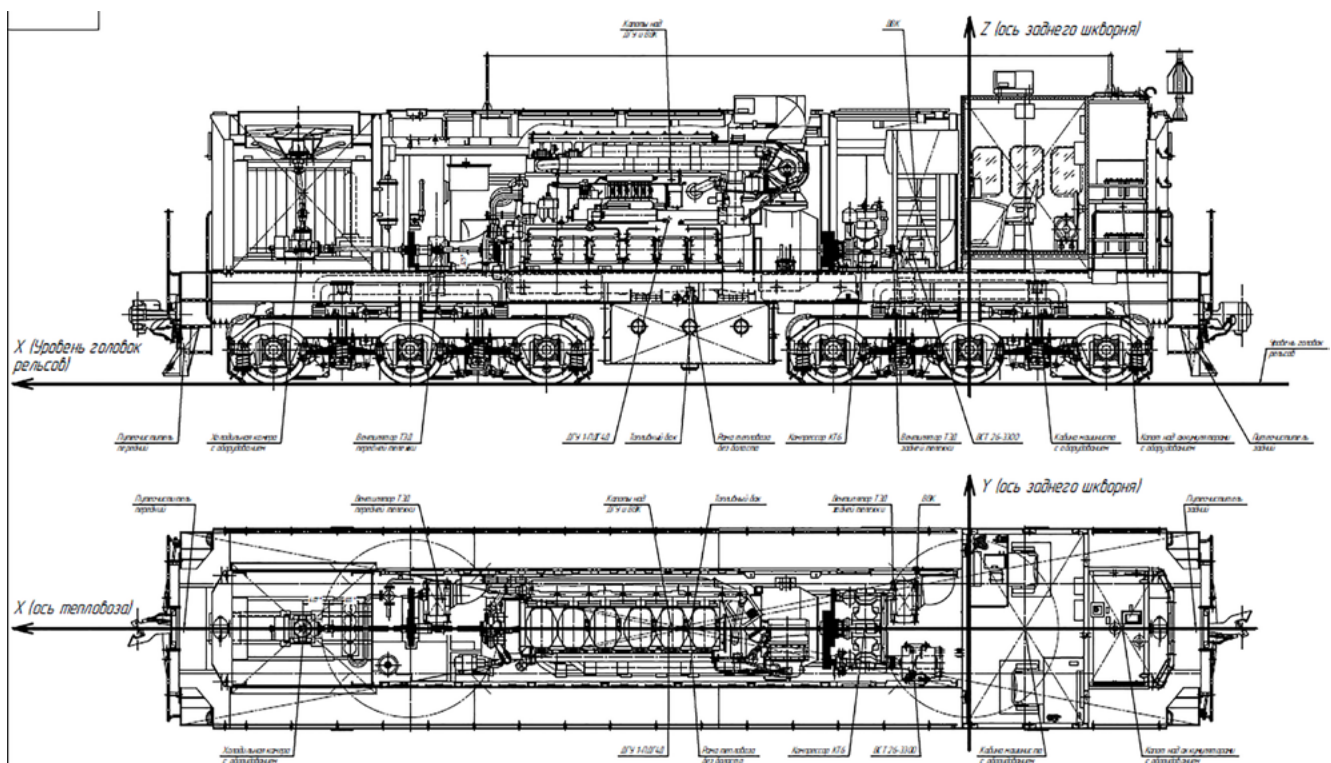


Рис. 2. Монтажная схема расположения оборудования тепловоза ТЭМ2

дования тепловоза ТЭМ2 согласно табл. 1. Массы и расположения узлов оборудования рамы приведены в табл. 1. С учетом приложенного веса оборудования (табл. 1) и собственной массы модели рамы расчетная масса рамы с оборудованием составила 75 000 кг.

На рис. 3 представлена конечно-элементная модель главной рамы тепловоза ТЭМ2. При дискретизации конструкции было сформировано 875 093 конечных элемента, соединенных через 408 249 узловых точек, что обеспечило высокую детализацию расчетной схемы.

При построении расчетной модели использовались специальные вспомогательные элементы: их задача заключалась в локальном распределении граничных условий, включая моделирование закреплений и имитацию характеристик рессорного подвешивания. Отметим, что применение таких элементов позволило учесть особенности передачи нагрузок между рамой и опорными узлами тележек без введения лишних жестких

связей, что повышает достоверность моделирования. Впрочем, дополнительные корректировки сетки в зонах концентрации напряжений также учитывались при подготовке расчетной схемы.

На модель рамы накладывались следующие закрепления:

- по продольной оси Z — в одном узле на оси автосцепки (сжатие, растяжение) или в заднем упоре (при ударе);

- по вертикальной оси Y — в нижнем конце балочных элементов, имитирующих рессорное подвешивание второй ступени, при этом узлы конечно-элементной модели рамы тепловоза в зонах опор на тележку соединялись с помощью элементов с верхним концом балочных элементов (рис. 4).

Продольные силы инерции, действующие на отдельные массы тепловоза при ударе силой 2,5 МН, определялись через продольное ускорение a_x вдоль оси Z полностью оборудованного и экипированного тепловоза. При этом в соот-

Таблица 1. Масса установленного оборудования и координаты их центра масс

Узел оборудования	Масса, т	Координаты центра тяжести узла, м		
		по оси X	по оси Y	по оси Z
Дизель-генераторная группа	23,310	4,625	-0,026	-2,534
Кабина машиниста с оборудованием	3,212	-0,852	0,0	3,081
Капот над аккумуляторными с оборудованием	2,226	-2,352	0,0	2,725
Топливный бак	1,495	4,300	0,0	1,674
Компрессор КТ 6	0,614	1,611	0,0	2,192
Вентилятор задней тележки	0,097	1,170	0,460	2,005
Вентилятор передней тележки	0,097	8,100	0,460	2,005
Путеочиститель задний	0,198	-3,473	0,0	0,545
Путеочиститель передний	0,198	12,073	0,0	0,545
Оборудованная холодильная камера	3,660	10,231	0,0	2,937
Капоты над ДГУ и ВВК	3,134	4,581	0,0	3,135
ВВК	0,830	Распределенная нагрузка		
Поручни, трубопровод, провода и прочие оборудование	9,933			
Запас песка	2,000	—	—	—
Запас топлива	5,400	—	—	—
Рама тепловоза без балласта	22,708	4,300	0,0	—
Учетная надтележечная масса, т	$\Sigma = 75,00$			
Материал несущих элементов рамы тепловоза	Сталь 3сп, $\sigma_r = 245$ МПа			

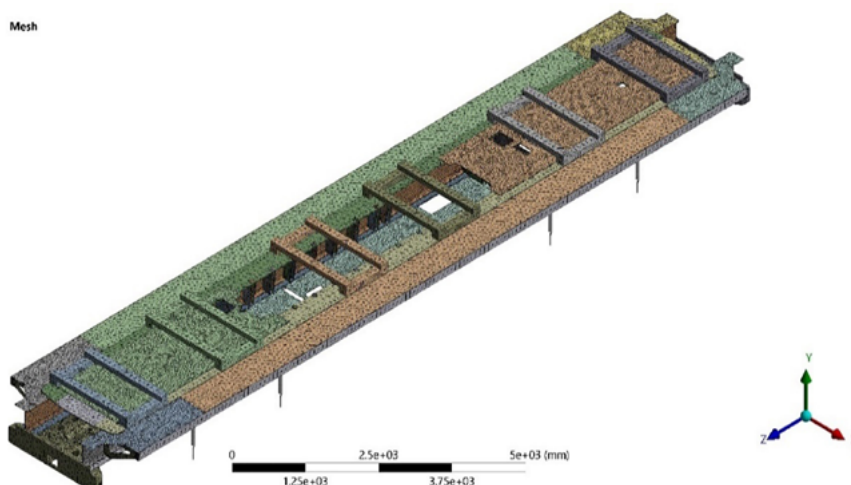


Рис. 3. Конечно-элементная сетка главной рамы тепловоза ТЭМ2

ветствии с [3] для тележек продольное ускорение принято равным $3g$ и приложена к шкворневым элементам главной рамы (рис. 5). Продольная сила инерции тележки составила:

$$N_{и_тел} = m_{тел} \cdot 3g. \quad (2)$$

Ускорение α_x вычислялось по формуле:

$$\alpha_x = \frac{F_N - i_{тел} m_{тел} 3g}{m_{л} - i_{тел} m_{тел}}. \quad (3)$$

В опорах рамы тепловоза на тележки от действия продольной силы инерции полностью оборуду-

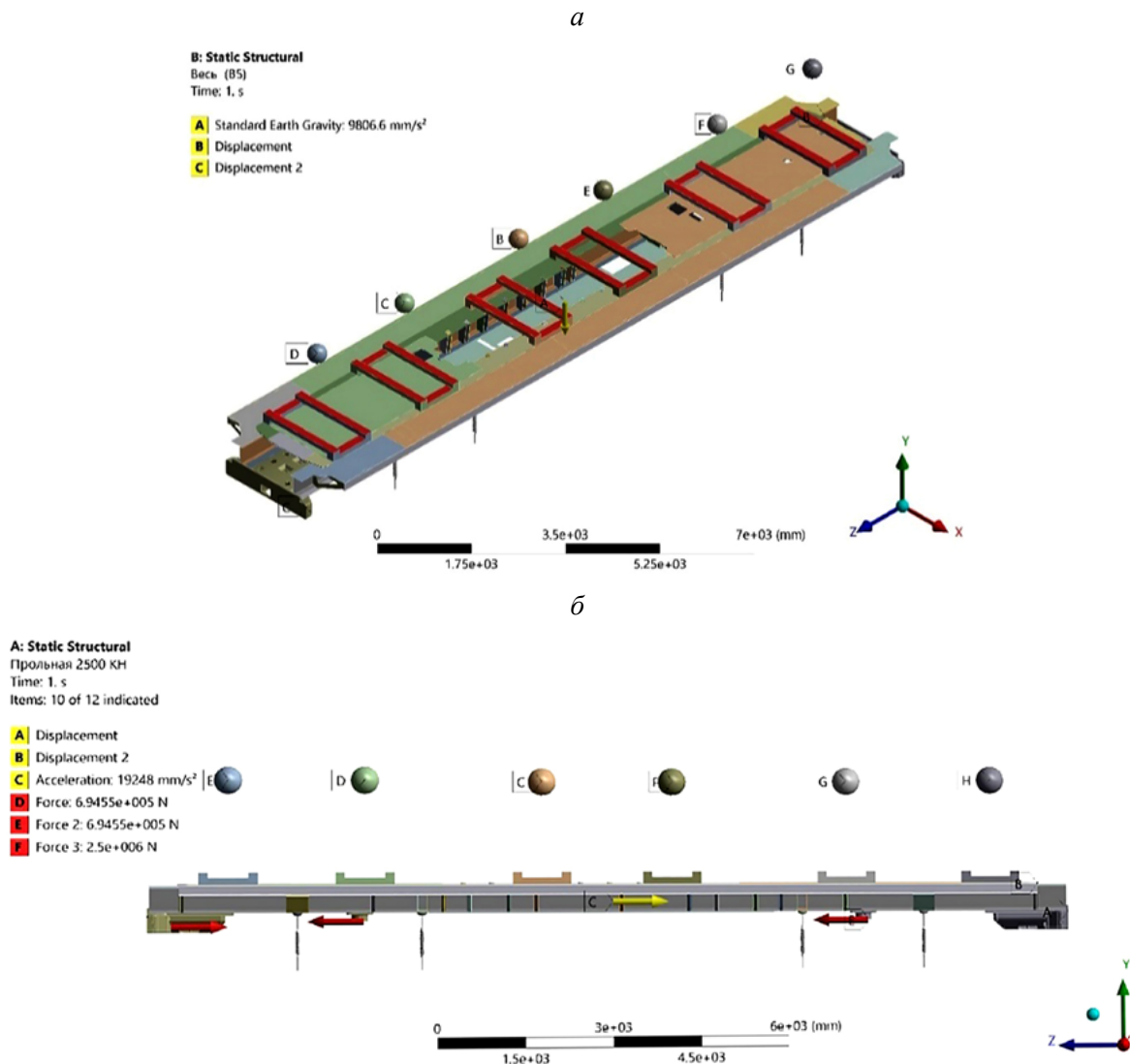


Рис. 4. Схема нагружения главной рамы тепловоза группированными силами веса размещенного на нем оборудования: *a* — вид сверху; *б* — вид с боковой стороны

Таблица 2. Принятые обозначения и полученные результаты

Обозначение	Наименование	Значение
$m_{\text{тел}}$	масса тележки, т	23,6
F_N	продольная сила удара, приложенная к автосцепке, МН	2,5
$i_{\text{тел}}$	число тележек в одной секции тепловоза	2
m_c	служебная масса одной секции тепловоза, т	120
$N_{\text{и_тел}}$	продольная сила инерции тележки, МН	0,695
α_x	продольное ускорение, мм/с ²	19248

дованного и экипированного тепловоза определены в модели автоматически как реакции в элементах, имитирующих рессорное подвешивание.

Результаты

По результатам численного моделирования установлено, что в конструкции главной рамы тепловоза ТЭМ2, при воздействии нормативных продольных и вертикальных нагрузок [2, 3], уровни напряжений в отдельных зонах превышают допустимое значение $0,9\sigma_{0,2}$ (221 МПа). Интересно, что в концевых частях рамы, осо-

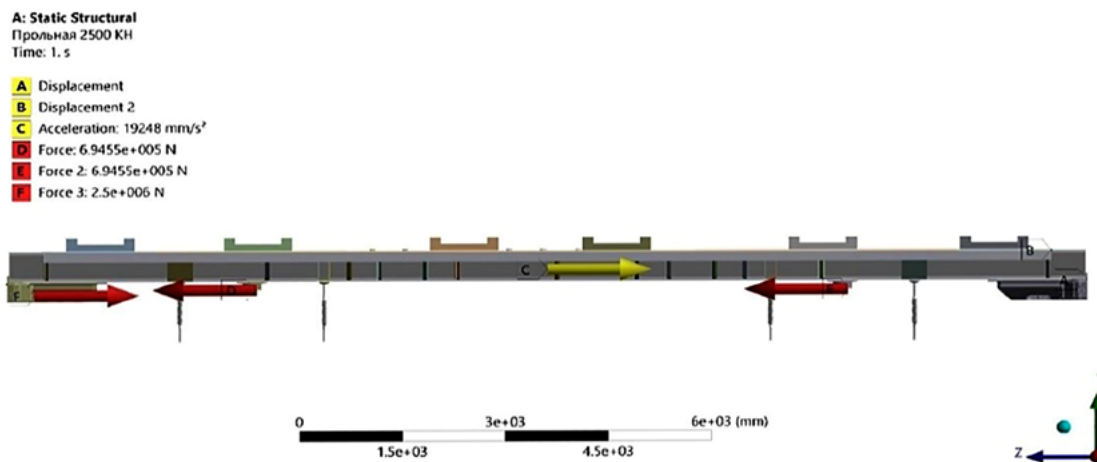


Рис. 5. Схема приложенных сил в продольном направлении главной рамы тепловоза ТЭМ2

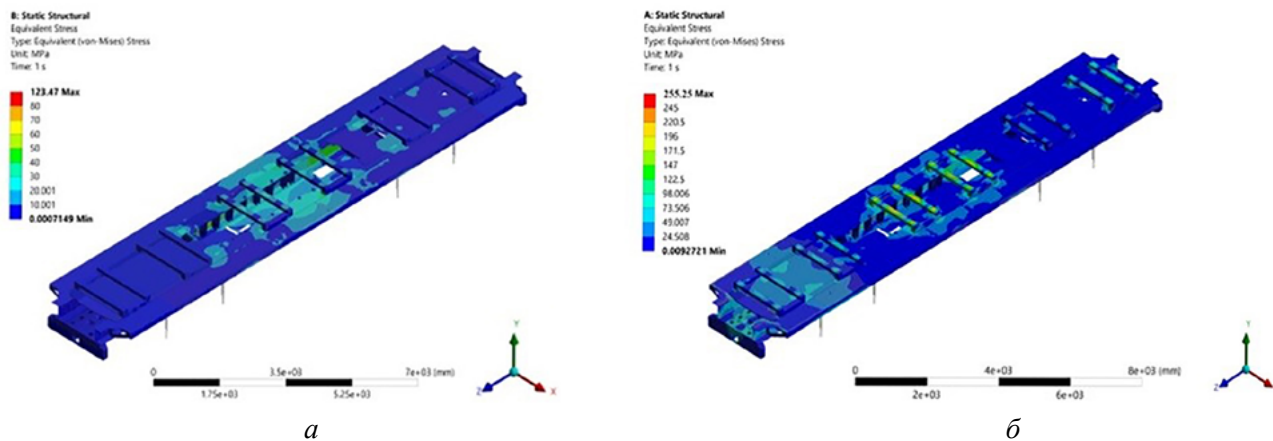


Рис. 6. Эпюры распределений напряжений в главной раме ТЭМ2 при режимах нагружения Ia (a) и Ib (б)

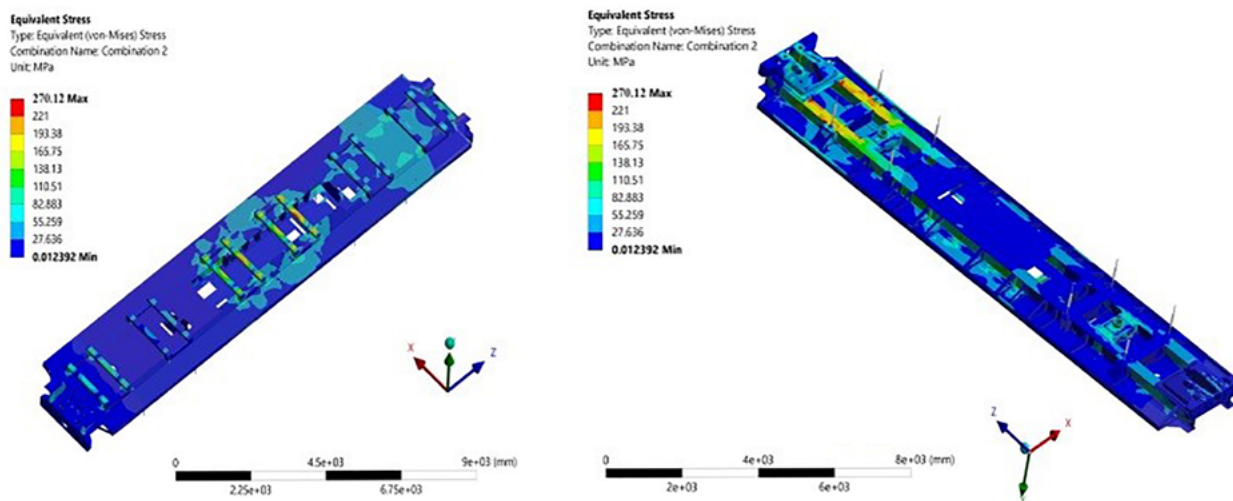


Рис. 7. Картина напряжений в главной раме тепловоза ТЭМ2 при совмещенном действии веса конструкции и продольного удара (2,5 МН), вид сверху и снизу

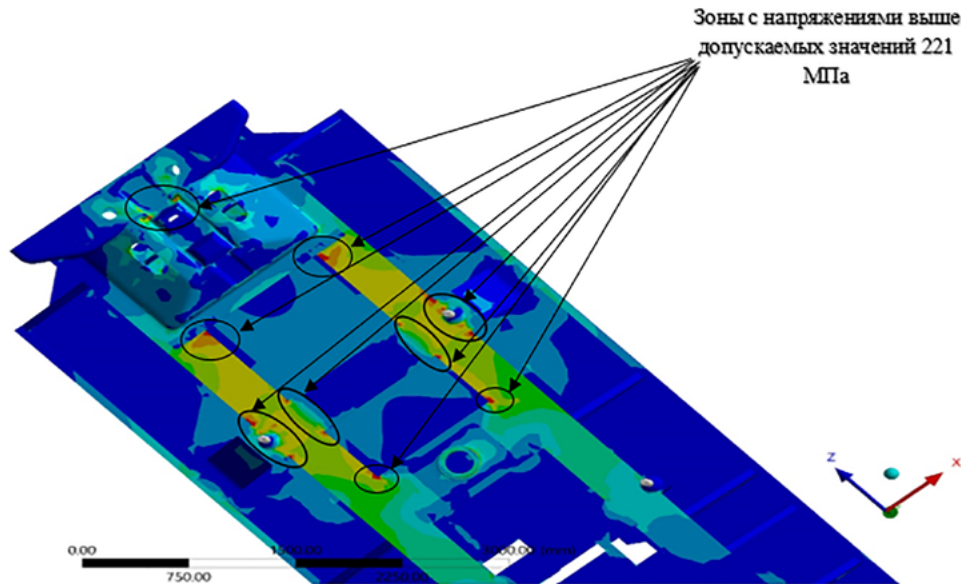


Рис. 8. Области локального превышения допустимых напряжений в нижней части главной рамы

бенно в областях сварных соединений между стяжными ящиками и хребтовыми балками, напряжения достигают уровня предела текучести материала, сопровождаясь локальными пластическими деформациями.

Расчет остаточного ресурса главной рамы тепловоза проводился с учетом возможности возникновения остаточных деформаций под воздействием эксплуатационных нагрузок: вертикальных усилий от массы оборудования, а также продольных ударов в автосцепку с силой до 2,5 МН. Впрочем, для корректной оценки ресурса применен деформационный критерий малоциклового усталости, обоснованный в трудах Э. С. Оганьяна, Н. А. Махутова и А.С. Гасюка [4–7]. Данный критерий учитывает процесс накопления пластических повреждений в материале при ограниченном числе циклов нагружения и описывается уравнением Мэнсона — Коффина. Ниже приведенное уравнение характеризует исчерпание пластических свойств материала (табл. 3) при достижении разрушающего числа циклов нагружения N_ε :

$$\Delta \varepsilon_p = C \cdot N_\varepsilon^{-m_p}. \quad (4)$$

Таблица 3. Принятые обозначения и полученные результаты в расчетах

Обозначение	Наименование	Принятое значение и результаты
$\Delta \varepsilon_p$	размах или односторонняя пластическая относительная пластическая деформация в цикле нагружения заданной силой	0,0022
m_p	эмпирические параметры материала	0,6
C	показатель диаграммы упрочнения за пределом упругости материала	определяется по $C = -0,5 \ln(1 - \psi)$ $C = 0,3465$
ψ	относительное сужение материала при растяжении	для стали $\psi = 0,5$
N_ε	среднегодовое количество/циклов сжимающих продольных сил	50
P	нормативные силы	2,5 МН
T	ресурс главной рамы тепловоза типа ТЭМ2 по малоциклового усталости	≈ 66 лет

На основании данных [3] и анализа эксплуатационных измерений [5] установлено, что продольные усилия величиной 2,5 МН имеют преимущественно сжимающий характер. Их среднегодовое количество (N_ε) составляет около 50 циклов, что

подтверждается испытаниями, проведенными в АО «ВНИКТИ» [12].

Подставляя эти значения в уравнение Мэнсона — Коффина, получено разрушающее число циклов нагружения главной рамы, равное приблизительно 4600 циклам.

Кроме того, расчеты [12] показывают, что запас прочности по номинальным напряжениям составляет около 1,22 относительно предела текучести материала. Соответственно, запас по долговечности (n_N), определенный по зависимости $n_n = f(n_r)$ [13], равен 1,4. Отметим, что, исходя из этих данных, прогнозируемый ресурс главной рамы тепловоза ТЭМ2 по критерию малоциклового усталости при эксплуатации под действием продольных сил через автосцепку составляет примерно 66 лет и определяется по формуле:

$$T = \frac{N_\varepsilon}{N_\varepsilon n_N}. \quad (5)$$

Выводы и обсуждение

В рамках настоящего исследования был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния главной рамы тепловоза ТЭМ2 с целью оценки ее прочностных характеристик и ресурса в условиях расчетных режимов нагружения. Для этого были применены методы конечно-элементного моделирования и расчетные зависимости. Предложенный подход к оценке остаточного ресурса применим не только к локомотивам с истекшим сроком службы, но и для обоснования продолжения эксплуатации уже используемых локомотивов. Результаты проведенного анализа позволяют сформулировать следующие ключевые выводы:

1. Расчеты выявили локальные зоны превышения допустимых напряжений (221 МПа) в местах концентрации, таких как соединения стяжных ящиков с хребтовыми балками и технологические отверстия. Эти напряжения обуслов-

лены кратковременными продольными ударными нагрузками через автосцепку (режим Iб) с частотой не более 50 циклов в год. Остаточный ресурс главной рамы оценен по деформационному критерию малоциклового усталости, учитывающему ограниченное число циклов и допустимость локальных пластических деформаций.

2. По критерию малоциклового усталости, с учетом максимальных напряжений от продольных сил через автосцепку, ресурс главной рамы тепловоза ТЭМ2 составляет 66 лет.

3. Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование методов неразрушающего контроля для раннего обнаружения дефектов в зонах концентрации напряжений, а также учет эксплуатационных факторов, включая динамические нагрузки от путевых неровностей, температурные и климатические воздействия, на ресурс несущих конструкций.

Список источников

1. Хамидов О. Р. Прогнозирование остаточного ресурса главной рамы и продление сроков службы маневровых локомотивов на АО «УТЙ» / О. Р. Хамидов, А. М. У. Юсуфов, Н. С. Кодиров и др. // *Universum: технические науки*. — 2022. — № 4-5(97). — С. 47–54. — DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13384.
2. ГОСТ 34939—2023. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. — Введен в действие с 01.08.2024. — М.: Стандартинформ, 2023. — 45 с.
3. Нормы для расчета прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог колеи 1520 мм. — М.: ВНИИЖТ, 1998. — 145 с.
4. Махутов Н. А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность / Н. А. Махутов. — М.: Машиностроение, 1981. — 272 с.
5. Оганьян Э. С. Критерии несущей способности конструкций локомотивов в экстремальных условиях нагружения: дисс. ... д-ра техн. наук / Э. С. Оганьян. — Коломна, 2004. — 389 с.

6. Махутов Н. А. Методы расчета на прочность и долговечность элементов конструкций подвижного состава / Н. А. Махутов, Э. С. Оганьян. — М.: Наука, 2021.
7. Гасюк А. С. Оценка и прогнозирование технического состояния локомотивов по ресурсу их несущих конструкций: дисс. ... канд. техн. наук / А. С. Гасюк. — М., 2022. — 162 с.
8. Оганьян Э. С. Расчетно-экспериментальная оценка ресурса базовых частей локомотивов для обеспечения их безопасной эксплуатации / Э. С. Оганьян, Г. М. Волохов, А. С. Гасюк, Д. М. Фазлиахметов // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2018. — № 2. — С. 39–43.
9. Оганьян Э. С. Безопасная эксплуатация локомотивов по ресурсу их базовых частей / Э. С. Оганьян, А. С. Гасюк, Г. М. Волохов и др. // Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 6. — С. 54–58. — DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58.
10. Manson S. S. Fatigue: A Complex Subject — Some Simple Approximations / S. S. Manson, L. F. Coffin // *Experimental Mechanics*. — 1965.
11. Волохов Г. М. Модернизация маневровых тепловозов с продлением срока службы / Г. М. Волохов, Э. С. Оганьян, Г. И. Гаджиметов и др. // *Локомотив*. — 2019. — № 4(748). — С. 32–34.
12. Тепловоз ТЭМ2. Модернизация с продлением срока службы. Расчет на прочность главной рамы. Отчет № И 15-24-16. — Коломна: ВНИКТИ, 2016.
13. Махутов Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. — В 2 частях. Часть 2: Обоснование ресурса и безопасности / Н. А. Махутов. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.

Дата поступления: 22.04.2025

Решение о публикации: 15.05.2025

Контактная информация:

ГРИГОРЬЕВ Павел Сергеевич — канд. техн. наук, доц.;
grigorev.p@gmail.com

КОДИРОВ Нозимжон Солиевич — аспирант;
nazimzhank@bk.ru

БАТ-ЭРДЭНЭ Отгон-Эрдэнэ — аспирант;
nazimzhank@bk.ru

Strength Assessment of the TEM-2 Locomotive Main Frame Exposed to Static and Impact Loads

P. S. Grigorev, N. S. Kodirov, O. Bat-Erdene

Russian University of Transport, 9, bld. 9, Obraztsova Str., Moscow, 127994, Russian Federation

For citation: Grigorev P. S., Kodirov N. S., Bat-Erdene O. Strength Assessment of the TEM-2 Locomotive Main Frame Exposed to Static and Impact Loads. *Proceedings of Petersburg State Transport University*, 2025, vol. 22, iss. 2, pp. 395–406. (In Russian) DOI: 10.20295/1815-588X-2025-2-395-406

Summary

Purpose: This paper presents an analysis of the strength and service life of the main frame of the TEM-2 shunting locomotive carried out in accordance with regulatory requirements. The research is aimed at determining the stress-strain state (SSS) of the structure exposed to static and impact loads, as well as at checking compliance with regulatory documents, taking into account the expired service life of these locomotives. **Methods:** In order to achieve the above-stated objectives, a number of tasks were carried out. These included finite element analysis, modelling of the frame loading considering the weight distribution and onboard equipment layout, and evaluation of the structural response under specific loading conditions. Special attention was given to the phenomenon of low-cycle fatigue and its impact on the durability of the TEM-2 main frame. **Results:** The findings have enabled an assessment of the current technical condition of the main load-bearing structure,

identification of critical areas, and the development of recommendations for extending the remaining service life of the locomotive. **Practical significance:** The study provides a detailed evaluation of the stress–strain behaviour of the TEM-2 locomotive main frame under design load conditions. This information is of significant interest for enhancing the safety and reliability of shunting locomotives. The results obtained are in line with current regulatory requirements and can form the basis for improving the standards for structural strength calculations and determining design loads for durability assessment of load-bearing elements.

Keywords: Locomotive main frame, TEM-2 shunting locomotive, stress-strain state, residual life assessment, low-cycle fatigue, load-bearing structure strength, finite element analysis.

References

1. Khamidov O. R., Yusufov A. M., Kodirov N. S. et al. Prognostirovanie ostatochnogo resursa glavnoy ramy i prodlenie srokov sluzhby manevrovyykh lokomotivov na AO “UTY” [Forecasting the residual life of the main frame and extending the service life of shunting locomotives at UTY JSC]. *Universum: tekhnicheskije nauki* [Universum: technical sciences]. 2022, Iss. 4-5(97), pp. 47–54. DOI: 10.32743/UniTech.2022.97.4.13384. (In Russian)
2. GOST 34939—2023. Lokomotivy. Trebovaniya k prochnosti i dinamicheskim kachestvam. Vveden v deystvie s 01.08.2024 [GOST 34939—2023. Locomotives. Requirements for strength and dynamic qualities. Put into effect on 01.08.2024]. Moscow: Standartinform Publ., 2023, 45 p. (In Russian)
3. Normy dlya rascheta prochnosti nesushchikh elementov, dinamicheskikh kachestv i vozdeystviya na put' ekipazhnoy chasti lokomotivov zheleznykh dorog kolei 1520 mm [Standards for calculating the strength of load-bearing elements, dynamic qualities and the impact on the track of the undercarriage of locomotives of 1520 mm gauge railways]. Moscow: VNIIZhT Publ., 1998, 145 p. (In Russian)
4. Makhutov N. A. *Deformatsionnye kriterii razrusheniya i raschet elementov konstruktsiy na prochnost'* [Deformation criteria for failure and strength calculation of structural elements]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, 272 p. (In Russian)
5. Ogan'yan E. S. *Kriterii nesushchey sposobnosti konstruktsiy lokomotivov v ekstremal'nykh usloviyakh nagruzheniya: diss. ... d-ra tekhn. nauk* [Criteria for the bearing capacity of locomotive structures under extreme loading conditions: diss. ... Doctor of Engineering Sciences]. Kolomna, 2004, 389 p. (In Russian)
6. Makhutov N. A., Ogan'yan E. S. *Metody rascheta na prochnost' i dolgovechnost' elementov konstruktsiy podvizhnogo sostava* [Methods for calculating the strength and durability of rolling stock structural elements]. Moscow: Nauka Publ., 2021. (In Russian)
7. Gasyuk A. S. *Otsenka i prognostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya lokomotivov po resursu ikh nesushchikh konstruktsiy: diss. ... kand. tekhn. nauk* [Assessment and forecasting of the technical condition of locomotives based on the resource of their supporting structures: diss. ... Cand. of Engineering Sciences]. Moscow, 2022, 162 p. (In Russian)
8. Ogan'yan E. S., Volokhov G. M., Gasyuk A. S., Fazliakhmetov D. M. *Raschetno-eksperimental'naya otsenka resursa bazovyykh chastey lokomotivov dlya obespecheniya ikh bezopasnoy ekspluatatsii* [Calculation and experimental assessment of the resource of basic parts of locomotives to ensure their safe operation]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Problems of mechanical engineering and machine reliability]. 2018, Iss. 2, pp. 39–43. (In Russian)
9. Ogan'yan E. S., Gasyuk A. S., Volokhov G. M. et al. *Bezopasnaya ekspluatatsiya lokomotivov po resursu ikh bazovyykh chastey* [Safe operation of locomotives based on the service life of their base components]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti* [Occupational safety in industry]. 2017, Iss. 6, pp. 54–58. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-6-54-58. (In Russian)
10. Manson S. S., Coffin L. F. *Fatigue: A Complex Subject — Some Simple Approximations*. Experimental Mechanics, 1965.

11. Volokhov G. M., Ogan'yan E. S., Gadzhimetov G. I. et al. Modernizatsiya manevrovyykh teplovozov s prodleniem sroka sluzhby [Modernization of shunting diesel locomotives with service life extension]. *Lokomotiv* [Lokomotiv]. 2019, Iss. 4(748), pp. 32–34. (In Russian)

12. *Teplovoz TEM2. Modernizatsiya s prodleniem sroka sluzhby. Raschet na prochnost' glavnoy ramy. Otchet № I 15-24-16* [Diesel locomotive TEM2. Modernization with service life extension. Strength calculation of the main frame. Report № I 15-24-16]. Kolomna: VNIKTI Publ., 2016. (In Russian)

13. Makhutov N. A. *Konstruktsionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. V 2 chastyakh. Chast' 2: Obosnovanie resursa i bezopasnosti* [Structural strength,

resource and technogenic safety. In 2 parts. Part 2: Justification of resource and safety]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2005, 610 p. (In Russian)

Received: April 22, 2025

Accepted: May 15, 2025

Author's information:

Pavel S. GRIGOREV — PhD in Engineering, Associate Professor; grigorev.p@gmail.com

Nozimzhon S. KODIROV — Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru

Otgon-Erdene BAT-ERDENE — Postgraduate Student; nazimzhank@bk.ru