

news/public/ru?STRUCTURE_ID=2&layer_id=4069&id=150202 (дата обращения 12.05.2014).

2. **Palm, B.** Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems – a review // *Int. J. Refrigeration*. – 2008. – N 31. – P. 552–563.

3. **Mohanraj, M.,** Muraleedharan, C., Jayaraj, S. A review on recent developments in new refrigerant mixtures for vapour compression-based refrigeration, air conditioning & heat pumps units / M. Mohanraj // *Int. J. Energy Res.* – 2011. – N 35. – P. 647–669.

4. «**Honeywell**» инвестирует в расширение производства ГФО-1234yf в США [Электронный ресурс]. – URL : [http://www.ozoneprogram.](http://www.ozoneprogram.ru/novosti/honivell_investiruet_gfo_1234yf)

[ru/novosti/honivell_investiruet_gfo_1234yf](http://www.ozoneprogram.ru/novosti/honivell_investiruet_gfo_1234yf) (дата обращения 10.02.2014).

5. **Environmental** impact of Solstice yf refrigerant / Fact sheet. 2014 [Электронный ресурс]. – URL : <http://www.1234facts.com/solstice-yf-refrigerant/#environmental-impact> (дата обращения 10.02.2014).

6. **Хладагенты** и окружающая среда / О.Б. Цветков // *Холодильная техника*. – 2013. – № 1. – С. 20.

7. **Способы** повышения эффективности режима «тепловой насос» в пассажирских вагонах железнодорожного транспорта : дис. ... канд. техн. наук / А.В. Михайлов. – Санкт-Петербург : ПГУПС, 2013. – 129 с.

УДК 629.4.023

Х. Р. Косимов

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РАМЫ ТЕПЛОВОЗА UZTE16M

Безопасная эксплуатация транспортного средства определяется остаточной прочностью деталей, узлов и конструкций. Статья посвящена моделированию и анализу напряженно-деформированного состояния рамы тепловоза. Определены наибольшие напряжения в сечениях рамы тепловоза типа UzTE16M.

подвижной состав, рама тепловоза, срок службы, несущие конструкции, прочность.

Введение

В связи с увеличением скоростей движения на железнодорожном транспорте, а также массы поездов (грузонапряженности) возрастают нагрузки на элементы экипажной части локомотивов, в том числе на рамы тепловозов. Структура элементов металлоконструкции механической части железнодорожного подвижного состава сложна. Эти элементы представляют собой ряд пространственных

конструкций с большим количеством разнообразных по конфигурации соединений и концентраторов напряжений, воспринимающих широкий спектр эксплуатационных нагрузок. Их размеры и форма определяются усилиями, деформациями и напряжениями в них, а также другими характеристиками состояния, которые формируются под действием нагрузок различного вида и характера, определяемых параметрами, назначением и условиями

эксплуатации подвижного состава. В зависимости от этих показателей данные элементы рассчитываются на прочность и жесткость при статических и динамических нагрузках [1]. Необходимые несущая способность и надежность конструкции должны обеспечиваться при возможно меньшей массе. Расчетная модель должна достаточно полно отражать и учитывать фактический спектр эксплуатационных нагрузок, строиться и решаться с учетом сочетания технических, экономических и других требований. Одна из особенностей рам тепловоза – работа при переменных напряжениях, в связи с чем они должны рассчитываться на усталостную прочность. Доминирующей формой расчета является проверочный расчет, связанный с определением коэффициента запаса прочности. Для таких расчетов необходимо располагать значениями действующих статических и динамических напряжений. Статическое напряжение определяется для всех основных нагрузок: массы кузова с установленным оборудованием, тяговых и тормозных усилий, усилий при вписывании в кривые [2]. Основным направлением совершенствования расчетных методов оценки ресурса несущих конструкций является более достоверный учет их нагруженности и особенности поведения материала в локальных, наиболее напряженных зонах упругопластической области. Конструкция рамы тепловоза сварная. Основу рамы образуют две хребтовые двутавровые балки и усиливающие накладки, изготовленные из стали Ст3 сп, а остальные детали рамы – из стали Ст3 кп. Все детали и узлы рамы соединены между собой сваркой. Топливный бак обычно подвешен к раме на болтах. С каждой стороны рамы к боковым кронштейнам приварены ящики для аккумуляторных батарей. Опоры рамы обычно представляют собой сферические пяты с каждой стороны рамы. Они опираются на сферические подпятники с роликовыми возвращающими устройствами, укрепленными на раме тележки. Тяговое усилие передается от тележки к раме через центральные шкворни, вокруг которых поворачиваются тележки в кривых участ-

ках пути, отверстия и посадочные места под дизель-генератор и оборудование тепловоза.

Расположение хребтовых балок над тележками тепловоза сопряжено с ограниченными возможностями развития их высоты (до 500 мм) и появлением значительных эксцентриситетов при приложении продольных тяговых усилий (350–500 мм). Чтобы преодолеть эти трудности, создаются проекты рам с боковыми продольными элементами большей строительной высоты [2].

Отказы сварных деталей тепловозов в эксплуатации чаще всего обусловлены хрупкими разрушениями, которые берут свое начало от развивающихся усталостных трещин. При этом долговечность деталей определяется, главным образом, случайным характером появления дефектов в наиболее нагруженных зонах. Как установлено в ходе исследований [2], усталостное разрушение несущих конструкций происходит в результате развития микропластических деформаций, перерастания их в трещину и распространения этой трещины. Можно отметить, что усталостное разрушение металла происходит при определенной интенсивности микропластических деформаций, уровень которой зависит от степени однородности структуры материала, а также его характеристик прочности и пластичности. В силу этого к несущим конструкциям подвижного состава предъявляются высокие требования как при их создании, так и при эксплуатации и модернизации.

В целях продления срока службы наиболее нагруженные части металлоконструкций необходимо усиливать. В связи с этим расчет и оценка остаточного ресурса и модернизации приобрели большую практическую значимость.

1 Схема нагружения рамы тепловоза

Прочностные и весовые показатели рам тепловоза определяются конструктивными и технологическими факторами. Это, прежде всего, принципиальная схема тепловоза,

определяющая систему сил, действующих на раму, конструктивное исполнение основных несущих элементов рамы и узлов соединения этих элементов друг с другом, а также допустимый уровень концентрации напряжений.

Расчетная схема рамы принята в виде консольно-балочной системы на четырех опорах в местах опирания на шаровые опоры тележек.

Основные геометрические размеры рамы тепловоза ТЭ10 М [3]:

- расстояние между осями шкворней 16969 мм;
- длина 15940 мм;
- расстояние между осями шкворневых опор тележки 1850 мм.

Загружение рамы выполнено по данному развески тепловоза (табл. 1) сосредоточенны-

ТАБЛИЦА 1. Развеска тепловоза UzTE16M (ось Z проходит через переднюю автосцепку)

Узел	Масса, кг	Плечо, мм	Момент, кг·мм
Дизель			
Рама дизеля	P_1	L_1	$P_1 \cdot L_1$
Блок цилиндров	P_2	L_2	$P_2 \cdot L_2$
Комплект втулок	P_3	L_3	$P_3 \cdot L_3$
Комплект поршней	P_4	L_4	$P_4 \cdot L_4$
Коленчатый вал	P_5	L_5	$P_5 \cdot L_5$
Турбокомпрессор	P_6	L_6	$P_6 \cdot L_6$
Приводной нагнетатель	P_7	L_7	$P_7 \cdot L_7$
Масляный насос	P_8	L_8	$P_8 \cdot L_8$
Водяной насос охлаждения дизеля	P_9	L_9	$P_9 \cdot L_9$
Водяной насос холодного контура	P_{10}	L_{10}	$P_{10} \cdot L_{10}$
Регулятор	P_{11}	L_{11}	$P_{11} \cdot L_{11}$
Неучтенная масса	P_{12}	L_{12}	$P_{12} \cdot L_{12}$
Генератор ГПЗ11 Б	P_{13}	L_{13}	$P_{13} \cdot L_{13}$
Муфта	P_{14}	L_{14}	$P_{14} \cdot L_{14}$
Двухмашинный агрегат	P_{15}	L_{15}	$P_{15} \cdot L_{15}$
Компрессор КТ7	P_{16}	L_{16}	$P_{16} \cdot L_{16}$
Рама тепловоза	P_{17}	L_{17}	$P_{17} \cdot L_{17}$
Фильтр грубой очистка масла	P_{18}	L_{18}	$P_{18} \cdot L_{18}$
Задний редуктор	P_{19}	L_{19}	$P_{19} \cdot L_{19}$
Карданные валы	P_{20}	L_{20}	$P_{20} \cdot L_{20}$
Передний редуктор	P_{21}	L_{21}	$P_{21} \cdot L_{21}$
Вентилятор передней тележки	P_{22}	L_{22}	$P_{22} \cdot L_{22}$

Окончание табл. 1

Узел	Масса, кг	Плечо, мм	Момент, кг·мм
Вентилятор задней тележки	P_{23}	L_{23}	$P_{23} \cdot L_{23}$
Вентилятор тягового генератора	P_{24}	L_{24}	$P_{24} \cdot L_{24}$
Топливный бак	P_{25}	L_{25}	$P_{25} \cdot L_{25}$
Водяной бак	P_{26}	L_{26}	$P_{26} \cdot L_{26}$
Теплообменник	P_{27}	L_{27}	$P_{27} \cdot L_{27}$
Воздухоочиститель	P_{28}	L_{28}	$P_{28} \cdot L_{28}$
Сцепное устройство переднее	P_{29}	L_{29}	$P_{29} \cdot L_{29}$
Сцепное устройство заднее	P_{30}	L_{30}	$P_{30} \cdot L_{30}$
Холодильник			
Камера холодильника	P_{31}	L_{31}	$P_{31} \cdot L_{31}$
Секции холодильные нормальные	P_{32}	L_{32}	$P_{32} \cdot L_{32}$
Секции холодильника укороченные	P_{33}	L_{33}	$P_{33} \cdot L_{33}$
Вентилятор	P_{34}	L_{34}	$P_{34} \cdot L_{34}$
Кабина	P_{35}	L_{35}	$P_{35} \cdot L_{35}$
Кузов над двигателем с обшивкой	P_{36}	L_{36}	$P_{36} \cdot L_{36}$
Аккумуляторная батарея	P_{37}	L_{37}	$P_{37} \cdot L_{37}$
Камеры высоковольтные	P_{38}	L_{38}	$P_{38} \cdot L_{38}$
Неучтенная масса тепловоза	P_{39}	L_{39}	$P_{39} \cdot L_{39}$

ми силами и распределенными нагрузками, которые сгруппированы в зависимости от их расположения (табл. 2).

Расположение действующих сил на раму и расчетная схема загрузки приведены на рис. 1.

Положение центра тяжести над тележечным строением относительно условной оси тепловоза определяем по формуле

$$X = \frac{\sum M}{\sum P},$$

где $\sum P$ – приведенные сосредоточенные силы.

Часть приведенных в табл. 2 сосредоточенных сил в расчетной схеме

$$\begin{aligned} \sum P = & R_1 + R_{17} + R_2 + R_{15} + R_3 + R_4 + R_{29} + \\ & + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 + R_{34} \quad \sum M_0 = -R_1 \cdot P_1 - \\ & - R_{17} \cdot P_2 - R_2 \cdot P_3 - R_{15} \cdot P_4 - R_3 \cdot P_5 - R_4 \cdot P_6 - \\ & - R_{29} \cdot P_7 - R_4 \cdot P_8 - R_5 \cdot P_9 - R_6 \cdot P_{10} - R_7 \cdot P_{11} - \\ & R_8 \cdot P_{12} - R_{34} \cdot P_{13}, \end{aligned}$$

тогда $X = \frac{\sum M_0}{\sum P}$.

Для приведения суммарной массы к середине тепловоза справа от условной оси на расстоянии подвешивания 6,51 м укладываем балласт весом 770 кг, тогда $\sum P = 90\,300$ кг.

Реакции в шаровых опорах будут одинаковыми, что обусловливается сбалансированным рессорным подвешиванием, и составят $P_1 = P_2 = P_3 = P_4$, кг.

ТАБЛИЦА 2. Приведенные сосредоточенные силы

Обозначение	Вес, кН	Плечи относительно условной оси, м	Плечи относительно концов рамы, м	Сумма сил в узле (по табл. 1)
R_1	24,53	7,15	0,82	P_{29}, P_{35}
R_{15}	6,60	5,73	2,24	P_{15}
R_2	25,00	4,75	3,22	$P_{16}, P_{21}, P_{22}, P_{24}, P_{38}$
R_{13}	89,00	2,96	5,01	P_{13}
R_3	9,50	2,26	5,71	P_7, P_{14}
R_{25}	20,00	0,085	7,88	P_{25}
R_4	404,73	0,0	7,97	P_{17}, P_{37}, P_{39}
R_5	204,42	0,012	7,96	$P_3, P_4, P_5, P_2, P_{12}, P_{28}, P_{36}$
R_6	23,44	-2,27	5,70	$P_1, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}$
R_7	15,65	-4,0	3,97	$P_{19}, P_{20}, P_{23}, P_{26}, P_{27}$
R_8	66,81	-6,51	1,46	$P_{18}, P_{31}, P_{32}, P_{33}, P_{34}$
R_{30}	11,35	-7,51	0,64	P_{30}

Часть приведенных в табл. 2 сосредоточенных сил для более точного построения эпюры изгибающих моментов, учитывая характер их приложения к раме, заменяем распределенными нагрузками: собственную массу рамы P_{17} , кг, и неучтенную массу тепловоза P_{39} , кг, распределяем на длине всей рамы $L = m$:

$$q_1 = \frac{P_{17} + P_{39}}{L},$$

тогда величина равнодействующей R_4 уменьшится и составит

$$R_4 = R_0 - R.$$

Собственная масса рамы P_1 дизеля распределяется по длине $L_{рД}$:

$$q_2 = \frac{P_1}{L_{рД}}.$$

Вес деталей дизеля и другие силы, входящие в силу R_3 , распределяем по длине части рамы дизеля [4] $L_{рД}$

$$q_3 = \frac{R_5}{L_{рД}}.$$

Масса топливного бака P_{25} на длине между его креплениями к раме тепловоза $L_{рД}$

$$q_4 = \frac{P_{25}}{L_{рД}}.$$

В связи с тем, что геометрические формы данных деталей весьма сложны, а габариты значительны, стендовые испытания реальных конструкций становятся металло- и трудоемкими и дорогостоящими. На сегодня разработаны программы, с помощью которых можно сделать многовариантный анализ расчетов с учетом всех нагрузок для получения достаточно точных результатов.

Большой вклад в разработку методик исследований в этой области внесли сотрудники ВНИИЖИТ и ВНИТИ [5].

В большинстве расчетов рама кузова тепловоза принималась в виде стержневой системы. Как показала практика, в зонах сопряжения балок рамы, в местах присоединения крон-

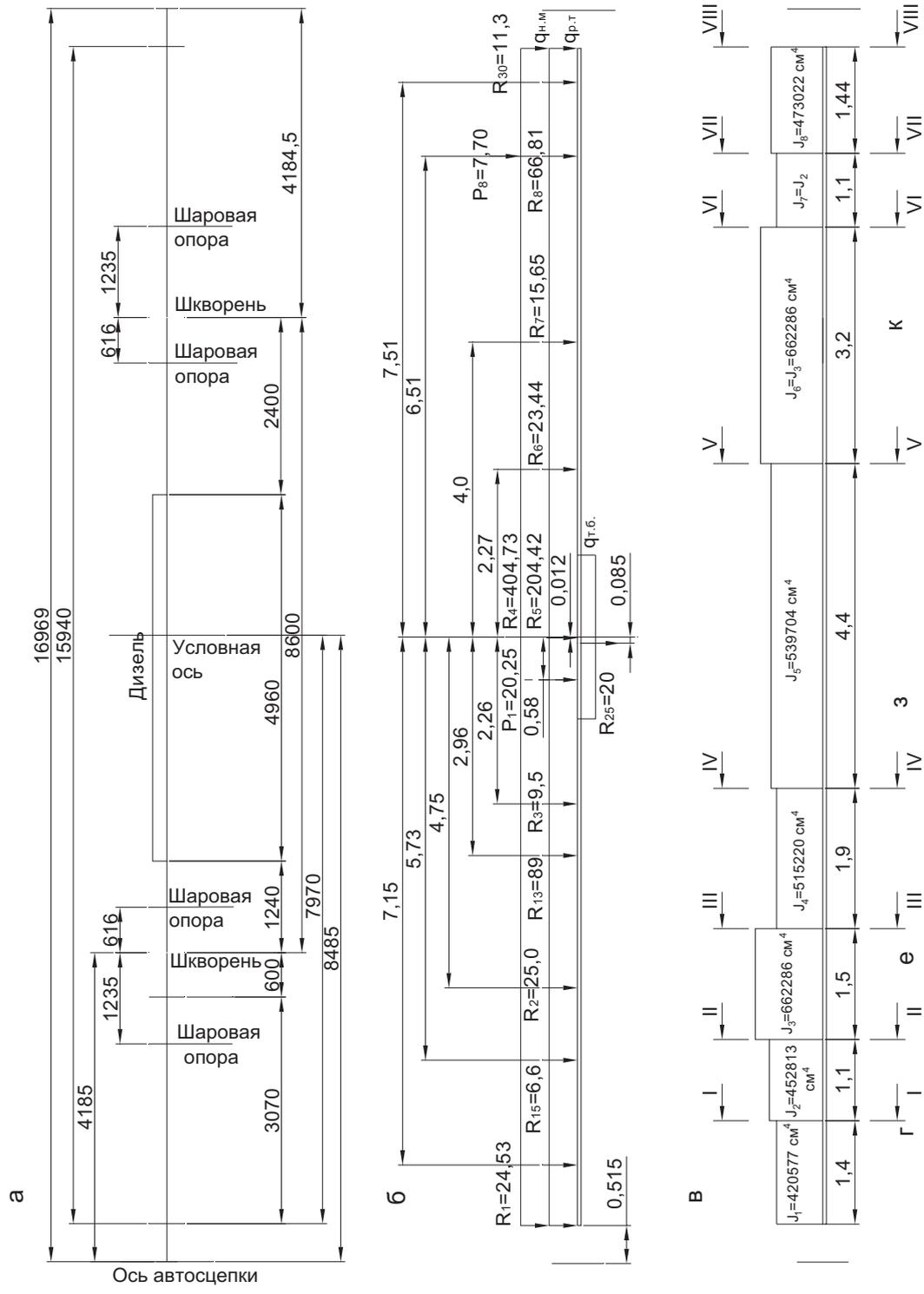


Рис. 1. Расчетная схема нагрузок, действующих на раму:
 а) геометрические параметры главной рамы тепловоза УзТЕ 16М; б) расчетная схема нагрузок, действующих на раму;
 в) эпюра моментов инерции поперечных сечений

штейнов, накладок и в других узлах сложной формы определить напряжения с помощью стержневой схемы нельзя [4]. В связи с этим целесообразно применение современных программ и методов расчета, в первую очередь, метода конечных элементов (МКЭ). МКЭ считается одним из наиболее эффективных способов решения задач механически деформируемого твердого тела, накоплен положительный опыт его применения в различных областях машиностроения. В настоящее время МКЭ является мощным численным методом, применимым к различным физическим задачам, при этом наибольшее распространение он получил в решениях задач теории упругости и в анализе несущей способности конструкций, его можно назвать одним из основных методов анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Применение этих методов позволит повысить точность расчетов и определить напряжения в элементах сложной формы, в первую очередь, в узлах соединения балок и в зонах присоединения отдельных деталей к несущим элементам.

2 Моделирование напряженно-деформированного состояния рамы кузова

Конечно-элементные модели главных рам, кабин и кузовов тепловозов позволяют не только выполнить прочностной статический расчет конкретного варианта конструкции, но и найти способ модернизации этих конструкций. Цель модернизации – оптимизация параметров модернизированных узлов при сохранении их габаритных характеристик. На

первом этапе моделирования после построения конечно-элементной модели производится статический расчет конструкции рамы тепловоза.

Для анализа напряженно-деформированного состояния применялся МКЭ, реализованный в программном комплексе SolidWorks Simulation, в редакторе которого и создавалась расчетная модель. Программа ориентирована на подготовку полноценной конечно-элементной модели с максимальными возможностями с учетом особенностей геометрического, силового характера и различных видов расчетов. Расчетная модель рамы кузова и приведена на рис. 2.

При статическом расчете в качестве нагрузки принята сила $R = 120$ кН, воздействующая на каждую опору через резинометаллические элементы. Разделение расчетной схемы на конечные элементы и расчет напряжений осуществлялись на ЭВМ. Анализ результатов соответствовал требованиям отраслевых норм прочности (табл. 3).

Расчет силовых факторов, действующих на раму, производился согласно [5]. При генерации сетки конечно-элементной идеализации объекта исследования использовались объемные конечные элементы в виде тетраэдра. Идеализированный вариант рамы тепловоза по МКЭ приведен на рис. 3. Модель состоит из 46 155 элементов и 90 893 узлов.

Результаты расчета величины напряжений в раме тепловоза при статическом нагружении представлены на рис. 4.

Напряжения не превышают норм [5], коэффициент запаса прочности по результатам расчетов на ЭВМ $n = 2,3$, что соответствует требованиям.

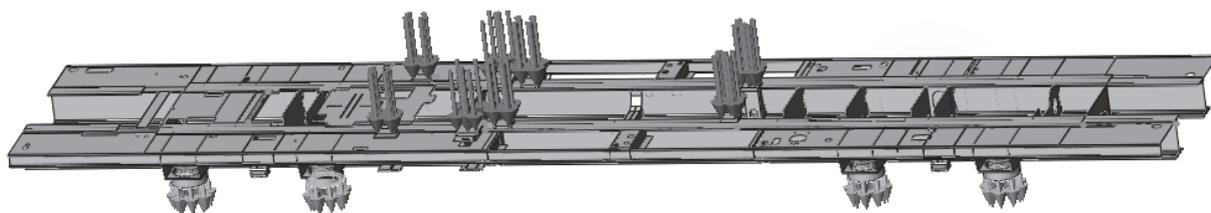


Рис. 2. Расчетная рама кузова тепловоза UzTE16M

ТАБЛИЦА 3. Исследования данные для расчета напряжений рам тепловоза

Элемент	Материал	Допустимое напряжение, МПа
Шкворень рамы тепловоза	Сталь 20 Л	140
Остальная часть рамы тепловоза	Сталь 3 сп	150

Имя модели: КАРКАС РАМА ЛИТЭ 03 (II)
Имя исследования: Исследование 4
Тип сетки: Сетка на твердом теле

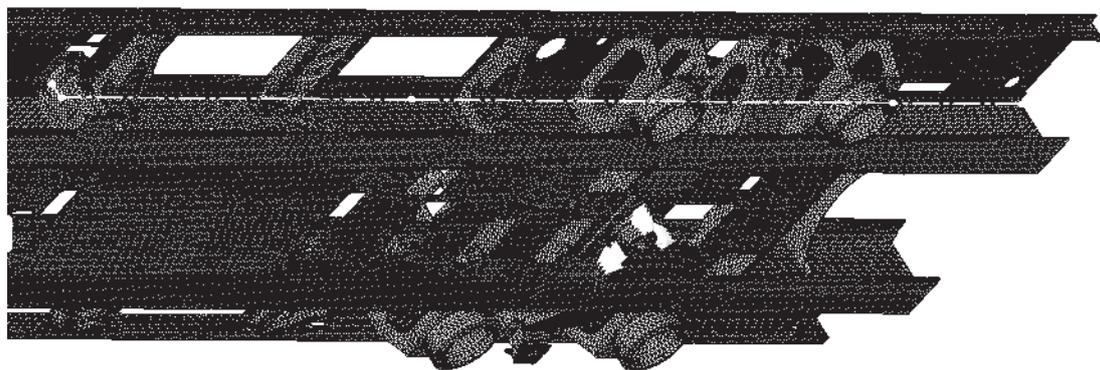


Рис. 3. Идеализированный вариант рамы кузова тепловоза

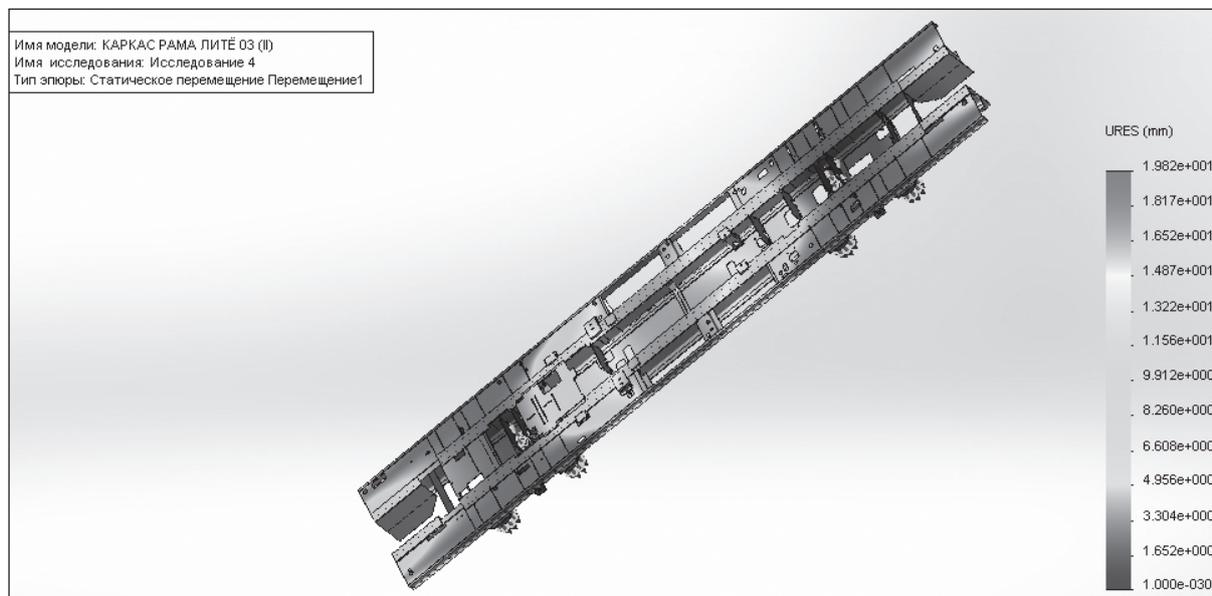


Рис. 4. Расчетная величина напряжений в раме кузова тепловоза при статическом нагружении

Заключение

С помощью программного обеспечения была построена конечно-элементная модель рамы кузова тепловоза, которая позволяет определять и анализировать перемещения, напряжения и деформации, рассчитываемые в данной конструкции. Рассмотренная расчетная модель рама кузова тепловоза типа UzTE16M позволяет исследовать их напряженно-деформированное состояние, дать оценку возможным изменениям при их модернизации, определить эффективные способы усиления при ремонте. При сравнении данных статического расчета с требованиями [5] можно сделать вывод, что расчетная схема была выбрана правильно. На следующем этапе производится динамический расчет, по результатам которого можно судить о долговечности конструкции.

УДК 656.2

В. А. Кудрявцев, А. А. Светашев

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ПРОЦЕСС НАКОПЛЕНИЯ ВАГОНОВ НА СОСТАВЫ ПОЕЗДОВ

Для расчета плана формирования поездов по направлениям необходим параметр «среднесуточные затраты вагоно-часов на накопление». В статье приведен детальный анализ процесса накопления вагонов на состав поезда в сортировочном парке станции на основе усредненного графика накопления вагонов. Предложены новые формулы для определения среднесуточных затрат вагоно-часов на накопление. Приведен расчет и определены среднестатистические значения исследуемых величин. Показано, что нормирование параметра накопления должно быть основано на результатах обработки статистических данных.

параметр накопления вагонов, средняя величина остатка, замыкающая группа, поступающая группа, группа вагонов, период накопления, затраты вагоно-часов.

Введение

На сортировочных станциях выполняется массовое расформирование и формирование

Библиографический список

1. **Оценка** остаточного ресурса рам тележек тепловозов : дис. ... канд. техн. наук / Н. С. Зайнидинов. – Санкт-Петербург, 2010. – 169 с.
2. **Повышение** надежности экипажной части тепловозов / А. И. Беляев, Б. Б. Бунин, С. М. Голубятников и др. ; под ред. Л. К. Добрынина. – Москва : Транспорт, 1984. – 248 с.
3. **Теория** и конструкция локомотивов / В. А. Симонов ; под ред. Г. С. Михальченко. – Москва : Маршрут, 2006. – 584 с.
4. **Тепловоз 2 ТЭ116** / С. П. Филонов, А. И. Гибалов. – Москва, 1985. – 328 с.
5. **Нормы** для расчета и оценки прочности несущих элементов, динамических качеств и воздействия на путь экипажной части локомотивов железных дорог МПС РФ колеи 1520 мм. – Москва : ВНИИЖТ, 1998. – 145 с.

поездов. Простой вагонов под накоплением составов является существенной частью основного качественного показателя работы сортировочной станции – простоя транзит-