

УДК 621.4.01

*А. В. ПУТЯТО, Е. Н. КОНОВАЛОВ, В. В. БЕЛОГУБ, С. С. ЯКИМОВИЧ*  
*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

## **ПРОЧНОСТЬ КУЗОВА И РАМЫ ВАГОНА ДИЗЕЛЬ-ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С УЧЕТОМ ИХ ФАКТИЧЕСКОГО ФИЗИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Разработана конечно-элементная модель кузова и рамы вагона дизель-электростанции с учетом фактических толщин их элементов после 25 лет эксплуатации. Выполнены расчеты на прочность в соответствии с нормативными требованиями. Установлено, что расчетные эквивалентные напряжения для различных режимов нагружения не превышают допустимых значений.

**Объект исследования.** Вагон дизель-электростанция модели 16-3001 предназначен для выработки электроэнергии с целью питания силовых установок, приборов и системы освещения помещений грузовых вагонов. Общая схема, а также внешний вид объекта, приведены на рисунке 1. Кузов вагона дизеля-электростанции включает дизельное, аппаратное, котельное отделения и отделение для отдыха обслуживающего персонала, а также кухню-салон, аккумуляторную и туалет [1].

В дизельном отделении установлены два дизель-генератора. Вагон спроектирован по габариту 1-Т. Масса тары вагона 64,5 т. Кузов цельнометаллический, длина его по раме 17 м.

Для обеспечения необходимой устойчивости обшивки она выполнена гофрированной и подкреплена стойками, продольными обвязками и дугами, изготовленными из гнутых профилей и соединенными между собой и с обшивкой сваркой. Несущие части рамы, подкрепляющие элементы стен и крыши (стойки, обвязки и дуги) выполнены из низколегированной стали 09Г2Д (предел текучести материала 305 МПа), а обшивка – из стали 10ХНДП (предел текучести материала 345 МПа). На боковых стенах кузова предусмотрены дверные и оконные проемы. Боковые стены изготовлены из гофрированной металлической обшивки толщиной 2,0 мм, подкрепленной угловыми, промежуточными и дверными стойками, а также верхней и нижней продольными обвязками.

Угловые стойки выполнены из гнутого уголка 80×80×4 мм, промежуточные – из Z-образного профиля, дверные – из специального профиля толщиной 4 мм, верхняя обвязка – из швеллера № 12, а нижняя – из уголка 120×80×8 мм.

а)



б)

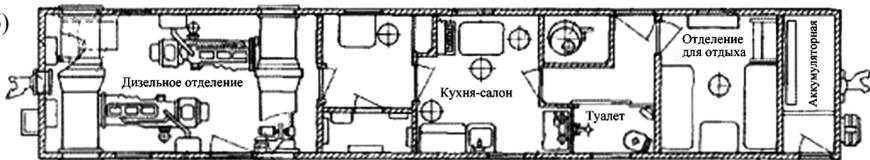


Рисунок 1 – Дизель–электростанция модели 16-3001:  
*а* – общий вид вагона; *б* – горизонтальный разрез

Торцовые стены также состоят из гофрированных листов толщиной 2 мм, подкрепленных угловыми и промежуточными стойками. Стойки сверху связаны верхней обвязкой, а снизу приварены к концевой балке рамы.

Рама кузова состоит из хребтовой, двух боковых, двух концевых, двух шкворневых, а также вспомогательных поперечных балок. Хребтовая балка образована двумя Z-образными балками № 31, соединенными диафрагмами и сваренными между собой по верхним полкам. В консольной части балка усилена розеткой и упорами автосцепки, а в зоне соединения со шкворневой балкой – надпятниковой коробкой. Боковые балки изготовлены из уголка 120×80×8 мм и усилены в дверном проеме подкрепляющими балками.

Шкворневые балки сварные коробчатого сечения. Они состоят из двух вертикальных и двух горизонтальных листов. Концевые балки сварные корытообразного сечения.

Пол состоит из брусьев, уложенных на металлический настил рамы (деревянные бруски и изолирующий материал в расчетной схеме не учитываются).

**Разработка конечно-элементной модели для выполнения прочностных расчетов кузова и рамы вагона.** Для расчета на прочность несущей металлоконструкции вагона разработана конечно-элементная модель кузова и рамы. Модель разработана на основе комплекта конструкторской докумен-

тации на вагон, имеющейся в наличии в вагонном депо Молодечно, а также с учетом фактических значений толщин конструктивных элементов, определенных по результатам ультразвуковой толщинометрии вагона № 53700100 после 25 лет эксплуатации (срок службы вагона).

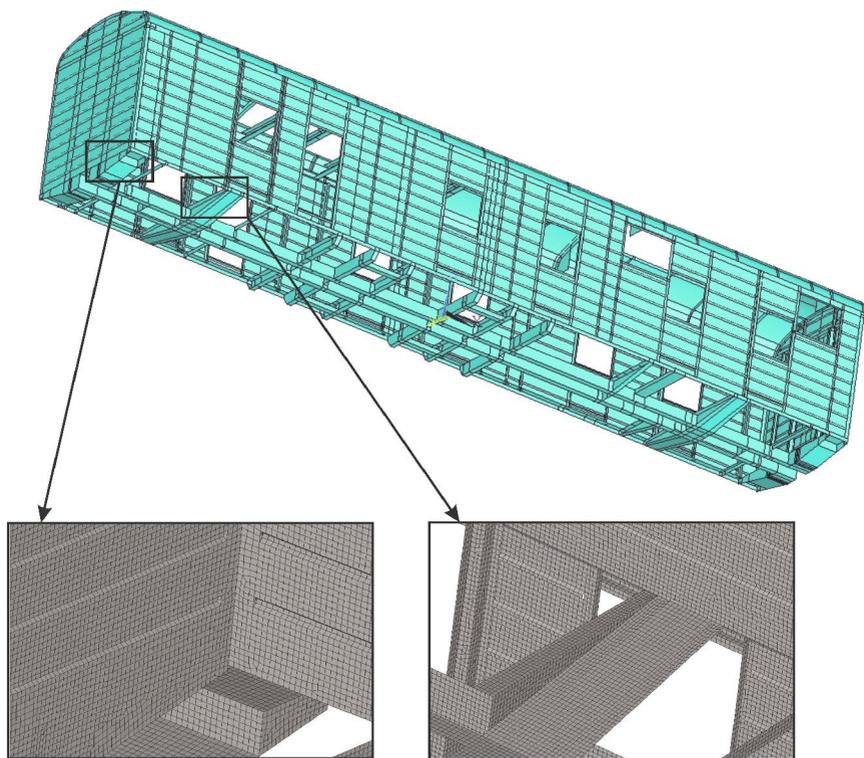
Для построения модели использовались два типа конечных элементов – плоские пластинчатые 3- и 4-узловые. Параметры расчетной модели следующие: количество узлов – 434735, количество конечных элементов – 433321. В соответствии с [2] модуль упругости материала принимается равным  $2,1 \cdot 10^5$  МПа, коэффициент Пуассона – 0,3.

Силовые граничные условия введены в соответствии с расчетными схемами, приведенными ниже. Кинематические граничные условия включают в себя ограничение степеней свободы в местах крепления упоров автосцепного устройства и пятников. При создании модели учтены также особенности силового нагружения, связанные со спецификой рассматриваемого вагона: установка двух дизель-генераторов, наличие основных и раздаточных топливных баков, наличие баков с водой, а также дополнительного массивного оборудования внутри вагона. На рисунке 2 приведена геометрическая модель вагона, а также фрагменты регулярного разбиения на конечные элементы.

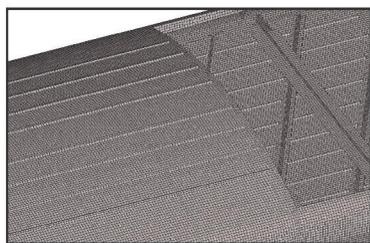
**Основные расчетные схемы и расчетные режимы.** «Нормами...» [2] установлено два основных расчетных режима, при которых продольные, вертикальные и боковые нагрузки для расчета прочности грузового вагона по допускаемым напряжениям учитываются в сочетаниях, приведенных в таблице 1.

По I расчетному режиму рассматривается относительно редкое сочетание экстремальных нагрузок. В эксплуатации ему соответствуют для грузовых вагонов осаживание и трогание тяжеловесного состава с места, соударение вагонов при маневрах, в том числе при роспуске с горок, экстренное торможение в поездах при малых скоростях движения, а также аварийный рывок (толчок) вагона при следовании в грузовом поезде. Основное требование при расчете на прочность по этому режиму – не допустить появления остаточных деформаций (повреждений) в узле или деталях.

По III расчетному режиму рассматривается относительно часто встречающееся сочетание умеренных по величине нагрузок, характерное для нормальной работы вагона в движущемся поезде. В условиях эксплуатации III режиму расчета соответствует случай движения вагона в составе поезда по прямым и кривым участкам пути и стрелочным переводам с допускаемой скоростью вплоть до конструкционной при периодических служебных регулировочных торможениях, периодических умеренных рывках и толчках, штатной работе механизмов и узлов вагона. Основное требование при расчете по этому режиму – не допустить усталостного разрушения узла или деталей.



Фрагмент крыши



Внутренняя сторона боковой стены

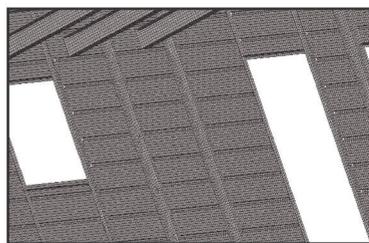


Рисунок 2 – Геометрическая модель вагона, а также фрагменты регулярного разбиения на конечные элементы

При ударном нагружении дополнительно учтены силы инерции от массивных элементов внутреннего и внешнего оборудования (топливные баки, водяные баки, дизель-генераторные установки и т. п.) при ускорении 3,5 g.

Таблица 1 – Значения и сочетания основных нагрузок для расчета на прочность кузова грузового вагона

Наименование основных расчетных нагрузок	Величины нагрузок	
	I расчетный режим	III расчетный режим
Продольные нагрузки	По п. 2.4.1*	По п. 2.4.1*
Вертикальные нагрузки: – сила тяжести брутто – вертикальная динамическая нагрузка  – вертикальная добавка от продольной силы инерции кузова	По п. 2.2.3* Не учитывается  По п. 2.4.3* при $N = 3,0$ МН	По п. 2.2.3* По п. 2.2.3* при $V_{\text{констр}}$ Не учитывается
Боковые нагрузки: – центробежная сила – поперечная составляющая продольной квазистатической силы	Не учитывается По п. 2.3.4* при $N = -2,5$ МН, $N = +2,0$ МН	По п. 2.3.2* Не учитывается
* Номера пунктов соответствуют приведенным в [2].		

**Результаты расчета для I режима нагружения.** Для I режима нагружения (сжатие) получены значения напряжений для всех элементов металлоконструкции кузова и рамы вагона (рисунок 3).

Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке, равные 266 МПа при допуске 274,5 МПа, возникают в нижней полке в области сочленения с нижним листом шкворневой балки со стороны установки дизель-генераторных установок. В свою очередь, уровень напряжений в нижнем листе шкворневой балки в месте соединения с хребтовой со стороны дизельного отделения составил 87,7 % от допускового. В области установки ударной розетки оказалась наиболее нагружена консольная балка (вертикальный лист), где расчетные напряжения составили 187 МПа, что существенно ниже допустимого уровня. Достаточно высокий уровень эквивалентных напряжений зафиксирован в месте соединения верхнего листа шкворневой балки с боковой обвязкой в области установки дизель-генератора (243 МПа, что составило 88,5 % от допускового уровня). Стойки боковой стены наиболее нагружены в области установки большого водяного бака в местах сочленения с боковой обвязкой, максимальные эквивалентные напряжения составили 175 МПа. В этой же части вагона зафиксирован максимальный уровень напряжений в обшивке боковой стены (161 МПа при допуске 327,75 МПа).

Наиболее нагруженной частью стоек торцевой стены аккумуляторного отделения оказалась зона сочленения с консольной балкой, где максимальное напряжение составило 131 МПа. В этой же области получены максимальные эквивалентные напряжения в обшивке торцевой стены (166 МПа, при допуске 327,75 МПа).

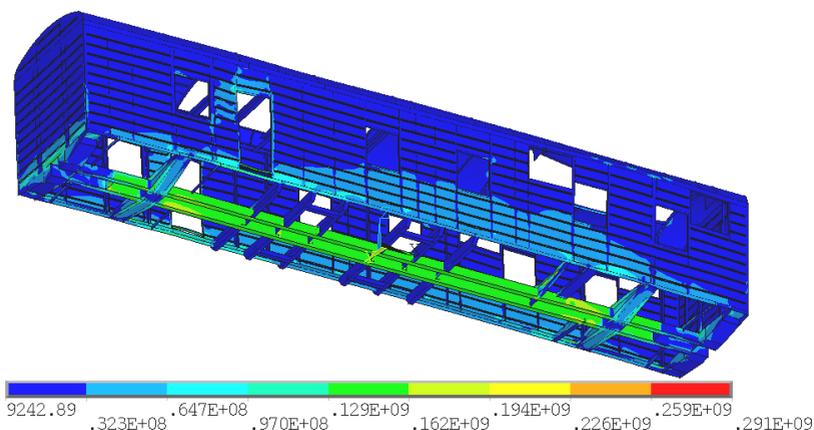


Рисунок 3 – Распределение эквивалентных напряжений (Па) при первом режиме нагружения (сжатие  $-2,5$  МН)

В продольных подкрепляющих элементах крыши малого люка в местах установки малого водяного бака напряжения составили 29 % от нормативно допускаемого значения. В то же время также в области установки малого люка крыши (дизельное помещение) в зоне консольной части (место установки топливного бака) напряжения обшивки крыши составили 109 МПа при допусках 327,75 МПа.

При рассматриваемом режиме нагружения в поперечных балках рамы максимальные напряжения (128 МПа) зафиксированы в местах соединения с хребтовой балкой (внутренние балки крепления топливных баков), а также вблизи соединения с боковой обвязкой рамы (крайние балки крепления топливных баков). Достаточно высокие напряжения (211 МПа при допусках 274,5 МПа) получены в средней части поперечной балки рамы (установка дизель-генератора), расположенной ближе к средней части вагона.

Результаты выполнения расчета эквивалентных напряжений для случая растяжения представлены на рисунке 4.

Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке, равные 259 МПа при допусках 274,5 МПа, возникают в области передних упоров автосцепного устройства. Уровень напряжений в верхнем листе шкворневой балки в месте соединения с хребтовой со стороны дизельного отделения составил 57 % от допускового. В области установки ударной розетки оказалась наиболее нагружена консольная балка (вертикальный лист), где расчетные напряжения составили 203 МПа, что также ниже допустимого уровня. Напряжения, близкие к допусковым, получены в месте соединения консольной балки с боковой обвязкой в области установки дизель-генераторов. Так, при допусках 274,5 МПа расчетные составили 269 МПа.

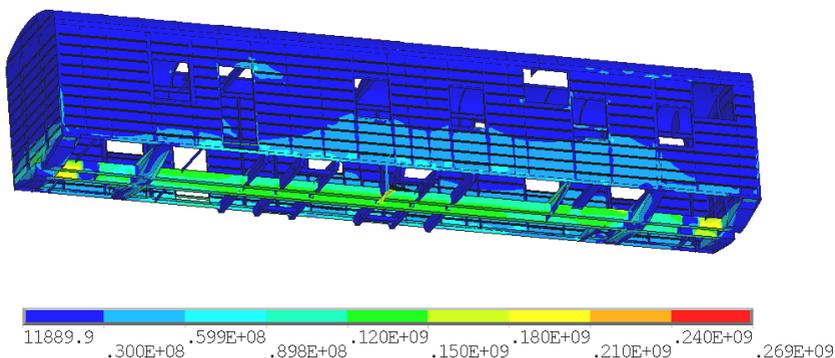


Рисунок 4 – Распределение эквивалентных напряжений (Па) при первом режиме нагружения (растяжение +2,0 МН)

Стойки боковой стены наиболее нагружены в области установки большого водяного бака в местах сочленения с боковой обвязкой, максимальные эквивалентные напряжения составили 148 МПа. В этой же части вагона зафиксирован максимальный уровень напряжений в обшивке боковой стены (161 МПа при допускаемых 327,75 МПа).

Наиболее нагруженной частью торцевой стены аккумуляторного отделения оказалась зона сочленения с консольной балкой, где напряжения составили 105 МПа. В этой же области получены максимальные эквивалентные напряжения в обшивке торцевой стены (180 МПа при допускаемых 327,75).

В продольных подкрепляющих элементах крыши малого люка в местах установки малого водяного бака напряжения составили 29 % от нормативно допускаемого значения. В то же время также в области установки малого люка крыши (дизельное помещение) в зоне консольной части (место установки топливного бака) напряжения обшивки крыши составили 120 МПа при допускаемых 327,75 МПа.

При рассматриваемом режиме нагружения в поперечных балках рамы максимальные напряжения (80 МПа) зафиксированы в местах соединения с хребтовой балкой (внутренние балки крепления топливных баков), а также вблизи соединения с боковой обвязкой рамы (крайние балки крепления топливных баков). Достаточно высокие напряжения (218 МПа при допускаемом значении 274,5 МПа) получены в средней части поперечной балки рамы (установка дизель-генератора), расположенной ближе к средней части вагона.

**Результаты расчета для III режима нагружения.** После проведения расчета для III режима (сжатие) получены значения напряжений для всех конечных элементов металлоконструкции кузова и рамы вагона (рисунок 5).

Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке, равные 130 МПа при допускаемом значении 190 МПа, возникают в нижней полке в

области сочленения с нижним листом шкворневой балки со стороны установки дизель-генераторных установок (к середине вагона). В свою очередь, уровень напряжений в нижнем листе шкворневой балки в месте соединения с хребтовой со стороны аккумуляторного отделения составил 72 % от допускаемого. В области установки ударной розетки оказалась наиболее нагружена консольная балка (вертикальный поперечный лист со стороны аккумуляторного отделения), где расчетные напряжения составили 113 МПа, что существенно ниже допустимого уровня.

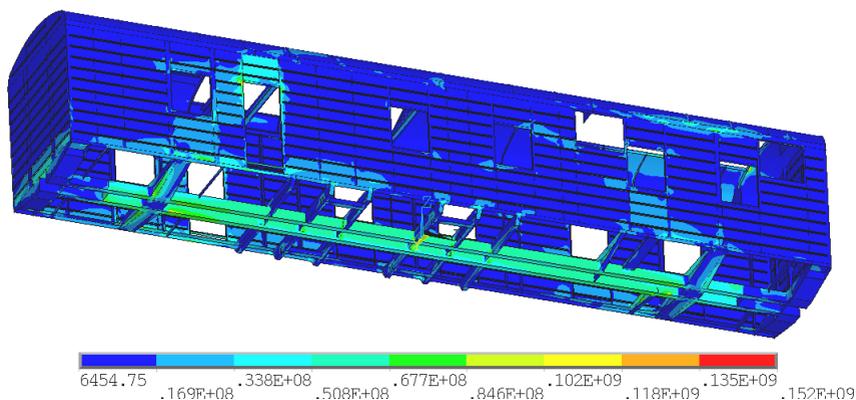


Рисунок 5 – Распределение эквивалентных напряжений (Па) при третьем режиме нагружения (сжатие –1 МН)

Достаточно высокий уровень эквивалентных напряжений зафиксирован в месте соединения верхнего листа шкворневой балки с боковой обвязкой со стороны аккумуляторного отделения в области установки большого водяного бака (152 МПа, что составило 80 % от допускаемого уровня).

Стойки боковой стены наиболее нагружены в области установки большого водяного бака в областях приближения к верхней и нижней обвязкам боковой стены, максимальные эквивалентные напряжения составили 134 МПа. В этой же части вагона зафиксирован максимальный уровень напряжений в обшивке боковой стены (130 МПа при допускаемых 195 МПа).

Наиболее нагруженной частью стоек торцевой стены аккумуляторного отделения оказалась зона сочленения с консольной балкой, где напряжения составили 66,6 МПа. В этой же области получены максимальные эквивалентные напряжения в обшивке торцевой стены (64,6 МПа при допускаемых 195 МПа).

В продольных подкрепляющих элементах крыши малого люка в местах установки малого водяного бака напряжения составили 51 % от нормативно допускаемого значения. В то же время, также в области установки малого люка крыши (дизельное помещение) в зоне консольной части (место уста-

новки топливного бака) напряжения обшивки крыши составили 137 МПа при допускаемых 195 МПа.

При рассматриваемом режиме нагружения в поперечных балках рамы максимальные напряжения (120 МПа) зафиксированы в местах соединения с обвязкой боковой стены (внутренние балки крепления топливных баков). Достаточно высокие напряжения (158 МПа при допускаемом значении 190 МПа) получены в области соединения обвязки боковой стены с поперечной балкой рамы (установка дизель-генератора), расположенной ближе к консольной части вагона.

Результаты выполнения расчета на прочность для случая растяжения приведены на рисунке 6.

Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке, равные 125 МПа при допускаемом значении 190 МПа, возникают в области передних упоров автосцепного устройства. Уровень напряжений в верхнем листе шкворневой балки в месте соединения с хребтовой со стороны аккумуляторного отделения составил 56 % от допускаемого.

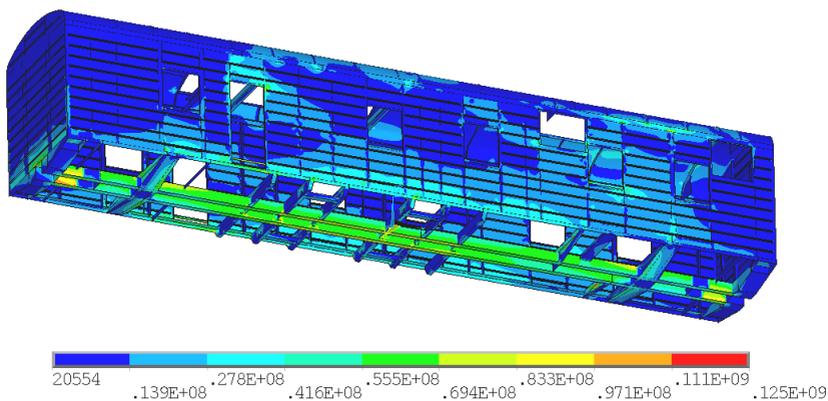


Рисунок 6 – Распределение эквивалентных напряжений (Па) при третьем режиме нагружения (растяжение +1 МН)

В области установки ударной розетки оказалась наиболее нагружена консольная балка (вертикальный лист), где расчетные напряжения составили 114 МПа, что также ниже допустимого уровня.

Напряжения, меньше допускаемых, получены в месте соединения консольной балки с боковой обвязкой в области аккумуляторного отделения. Так, при допускаемом значении 190 МПа расчетные составили 110 МПа.

Стойки боковой стены наиболее нагружены в области малого люка крыши в зоне установки топливного бака и малого водяного бака ближе к середине вагона, максимальные эквивалентные напряжения составили 111 МПа. Мак-

симальный уровень напряжений в обшивке боковой стены зафиксирован в области установки большого водяного бака (96 МПа при допускаемых 195 МПа).

Наиболее нагруженной частью стоек торцевой стены дизельного отделения оказалась зона сочленения с верхней обвязкой, где напряжения составили 24,6 МПа. В то же время максимальные эквивалентные напряжения в обшивке торцевой стены получены в нижней части при соединении с консольной балкой (66 МПа при допускаемых 195 МПа).

В продольных подкрепляющих элементах крыши малого люка в местах установки малого водяного бака напряжения составили 52 % от нормативно допускаемого значения. В то же время также в области установки малого люка крыши (дизельное помещение) в зоне консольной части (место установки топливного бака) напряжения обшивки крыши составили 145 МПа при допускаемых 195 МПа.

При рассматриваемом режиме нагружения в поперечных балках рамы максимальные напряжения (122 МПа) зафиксированы в местах соединения с обвязкой боковой стены (внутренние балки крепления топливных баков). Достаточно высокие напряжения (113 МПа при допускаемом значении 190 МПа) получены в области соединения поперечной балки рамы с хребтовой балкой (установка дизель-генератора), расположенной ближе к консольной части вагона.

**Результаты расчета для ударного режима нагружения.** Результаты проверки прочности кузова и рамы вагона при ударном нагружении приведены на рисунке 7.

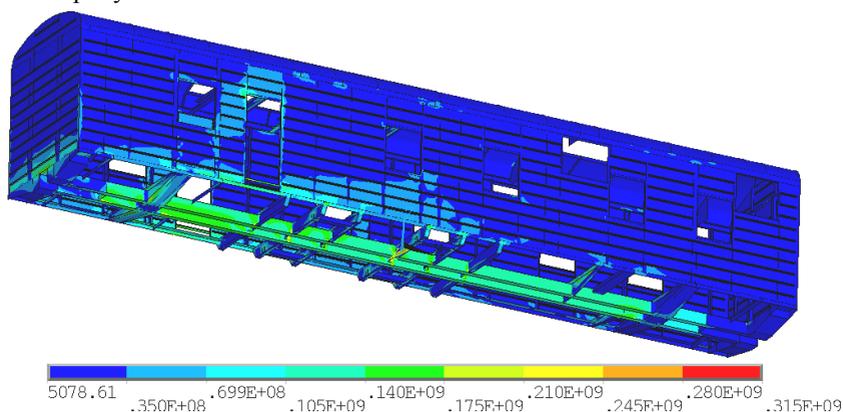


Рисунок 7 – Распределение эквивалентных напряжений (Па) при ударном нагружении 3 МН

Максимальные эквивалентные напряжения в хребтовой балке, равные 271 МПа при допускаемом значении 305 МПа, возникают в верхней полке в области сочленения с консольной балкой со стороны аккумуляторного

отделения (сторона соударения). В свою очередь, уровень напряжений в нижнем листе шкворневой балки в месте соединения с хребтовой с ударной стороны составил 93,3 % от допускаемого. В области установки ударной розетки оказалась наиболее нагружена консольная балка (горизонтальный лист), где расчетные напряжения составили 279 МПа, что также ниже допустимого уровня.

Достаточно высокий уровень эквивалентных напряжений зафиксирован в месте соединения верхнего листа шкворневой балки с боковой обвязкой с ударной стороны, а также при ее сочленении с верхним листом концевой балки (294 МПа, что составило 96,4 % от допускаемого уровня).

Стойки боковой стены наиболее нагружены в области установки большого водяного бака в местах сочленения с нижней обвязкой боковой стены, максимальные эквивалентные напряжения составили 209 МПа. В этой же части вагона зафиксирован максимальный уровень напряжений в обшиве боковой стены (315 МПа при допускаемых 345 МПа).

Наиболее нагруженной частью стоек торцевой стены дизельного отделения оказалась зона сочленения с консольной балкой, где напряжения составили 100 МПа. В этой же области получены максимальные эквивалентные напряжения в обшиве рассматриваемой торцевой стены (73,6 МПа при допускаемых 345 МПа). В то же время, в обшиве торцевой стены аккумуляторного отделения вблизи консольного бруса эквивалентные напряжения составили 220 МПа.

В продольных подкрепляющих элементах крыши большого люка в местах установки водяного бака (сочленение поперечных балок с верхней обвязкой торцевой стены) напряжения составили 84 % от нормативно допускаемого значения. В то же время, наибольшие расчетные напряжения обшивы крыши получены в области установки малого люка крыши (дизельное помещение) в зоне ближе к середине вагона (место установки топливного бака) и составили 109 МПа при допускаемых 345 МПа. При рассматриваемом режиме нагружения в поперечных балках рамы максимальные напряжения (298 МПа) зафиксированы в местах соединения с боковой обвязкой рамы. Напряжения, близкие к пределу текучести материала (301 МПа при допускаемом значении 305 МПа) получены в области соединения поперечной балки рамы с хребтовой балкой (установка дизель-генератора), расположенной ближе к консоли вагона.

**Заключение.** Выполненные расчеты на прочность кузова и рамы вагона дизель-электростанции модели 16-3001 № 53700100 с учетом фактических значений толщин металлоконструкции после 25 лет эксплуатации показали, что расчетные эквивалентные напряжения не превышают допускаемых значений, что соответствует требованиям «Норм...» [2].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Вагон дизель-электростанция [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aswn.ru/design/freightcars/izotermicheskie/powerstation>. – Дата доступа: 25.04.2013.

2 Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных) / ГосНИИВ-ВНИИЖТ. – М., 1996. – 319 с.

*A. V. PUTSIATA, E. N. KANAVALAU, V. V. BELAHUB, S. S. YAKIMOVICH*

### **BODY AND FRAME DURABILITY OF THE DIESEL ENGINE-POWER STATION CAR CONSIDERING THE ACTUAL PHYSICAL CONDITION AFTER LONG OPERATION**

The finite-element model of the diesel engine-power station car body and frame was created considering the actual condition of their elements after 25 years operation. Durability computations were performed according to standard requirements. It is installed, that obtained equivalent stress for various conditions of loading do not exceed limited values.

Получено 29.08.2013

**ISSN 2227-1104. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 7. Гомель, 2013**

---

УДК 621.763

*О. А. СУХАНОВА*

*Белорусский государственный университет транспорта, Гомель*

### **АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПРЕССОВАНИИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИТОВ**

Предложена методика конечноэлементного моделирования процессов образования изделий из волокнистых композитов. Получено распределение температуры по толщине заготовки в процессе формирования фрикционной накладке трансмиссии. Также выполнен анализ напряженно-деформированного состояния детали под действием сжимающих нагрузок.

Технический прогресс требует создания новых материалов с набором определенных свойств. Один из путей их получения связан с сочетанием нескольких разнородных веществ, например полимеров и стекловолокон. Связующим в таких композиционных материалах является непрерывная фаза (матрица), а дисперсной фазой (наполнителем) могут быть частицы или волокнистые материалы различной природы. Существенным фактором, обуславливающим применение полимерных композитов, является доступность и дешевизна составляющих их компонентов.

Основные параметры, характеризующие процессы получения армированных полимерных материалов – это давление, температура и время. Дав-