

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Орлов, С. А. Новый метод расчета в механике стержневых систем / С. А. Орлов // Вестник БелГУТа. – 2004. – № 2(9). – С. 29–34.

2 Орлов, С. А. Символьно-аналитический подход к анализу задач строительной механики / С. А. Орлов // Строительная наука и техника. – 2010. – № 4. – С. 47–50.

S. A. ARLOU

ANALYTICAL SOLUTIONS IN MECHANICS OF FRAMED STRUCTURES

In the article the features of analytical-functional solutions for internal force factors as well as deflections in test framed structure by experimental author's software are discussed. The technique of analytical representation generation different from finite element method is presented in our previous papers. These results are used as a standard solution generated on industry CAE system Autodesk Robot Structural Analysis for the arbitrary test construction.

Получено 19.03.2011

**ISBN 978-985-468-924-1. Механика. Научные исследования
и учебно-методические разработки. Вып. 5. Гомель, 2011**

УДК 621.4.01

А. В. ПУТЯТО

Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КРЫШКИ ЛЮКА ПОЛУВАГОНА ПРИ ПАДЕНИИ КУСКОВ ГРУЗА

Разработаны конечно-элементные модели, позволяющие определять напряженно-деформированное состояние крышки разгрузочного люка полувагона при падении кусков груза в процессе загрузки вагона. Расчет крышки люка при условиях ударного нагружения, рекомендуемого нормативом, показал, что ее типовая конструкция не соответствует современным нормативным требованиям.

В соответствии с требованиями [1] разгрузочные крышки люка полувагона должны рассчитываться на случай падения отдельных кусков груза массой 150 кг с высоты 3 м. Такие случаи могут возникать при погрузке вагонов кусковыми грузами, например, грейферными машинами. При падении груза в кузов вагона возникают существенные динамические напряжения, что приводит к повреждению элементов конструкций подвижного состава. Характерно, что ударные взаимодействия отрицательно влияют не только на несущие элементы конструкции, но и на навесное оборудование вагонов. Расчет на удар конструктивных узлов и элементов позволяет оценить на эта-

пе проектирования не только их прочность, но и надежность (путем сопоставления действующих напряжений с пределом выносливости материала). Этот же расчет входит составным элементом при определении спектра нагрузок деталей, что необходимо для их проектирования с заданным ресурсом. С внедрением вычислительных машин возникла потребность в разработке достаточно точных и эффективных методов расчета. Следует отметить, что практика эксплуатации полувагонов показала, что повреждаемость крышек люков является одной из наиболее часто встречаемых неисправностей [2–4].

Решение задачи ударного воздействия на крышку разгрузочного люка полувагона падающим грузом будем решать в программном комплексе ANSYS/LS-DYNA. С этой целью была создана геометрическая модель крышки люка. Для разбиения на конечные элементы принят элемент SHELL163 в формулировке *Belytschko-Wong-Chiang*, как наиболее подходящий при решении подобных задач. Материал задан моделью с билинейным кинематическим упрочнением, которая описывается четырьмя параметрами: плотностью $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$, модулем упругости $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, пределом текучести $\sigma_{\tau} = 345 \text{ МПа}$ и касательным модулем упругости $E_{\tau} = 3,45 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Для создания регулярной сетки элементов и исключения возникновения элементов неправильной формы геометрическая модель была разбита на вспомогательные геометрические элементы с заданием соответствующих толщин, разбиение которых гарантирует создание конечных элементов правильной прямоугольной в плане формы. Падающий груз принят эллипсообразной формы с полуосями 0,1 и 0,07 м и также представлен описанным материалом и конечным элементом. При разбиении задан размер конечного элемента 0,01 м.

Для дальнейшего анализа в программе необходимо создать так называемые *parts*. *Parts* – это совокупность элементов, обладающих уникальной комбинацией типа элемента, модели материала и геометрических параметров (толщина сечения). Дополнительно, для дальнейшего наложения граничных условий, создадим совокупность узлов, принадлежащих конечным элементам, аппроксимирующих геометрию падающего груза. При наложении связей на модель в местах крепления петель ограничены перемещения по всем направлениям, в областях замков запрещены вертикальные перемещения узлов.

В программе имеется более десятка различных типов контактных условий, которые учитывают тип контактирующих элементов, возможность разрушения (эрозии) элементов при контакте и др. Но одним из универсальных типов контакта является тип *Automatic surface to surface contact* (ASSC). При задании этого типа контакта указываются лишь контактирующие части (*parts*) и нет необходимости указывать конкретные контактирующие поверхности. Для каждой пары контактирующих частей задано: тип контакта (ASSC), коэффициент трения покоя, коэффициент динамиче-

ского трения, коэффициент вязкого трения, коэффициент вязкого демпфирования в процентах от коэффициента критического демпфирования. Коэффициент вязкого трения вводится для того, чтобы ограничить максимальную силу трения, возникающую в контакте. Значение коэффициента вязкого трения принято равным пределу текучести по касательным напряжениям, получаемого по формуле $\tau_T = \sigma_T / \sqrt{3}$. Коэффициент вязкого демпфирования принят равным 10 %.

К узлам груза приложено ускорение свободного падения, а также для форсирования расчета груз располагался вблизи крышки люка с приложением начальной скорости движения, значение которой соответствует высоте падения.

Геометрическая модель и фрагменты конечно-элементной сетки приведены на рисунке 1. Следует отметить, что специфика решаемой задачи позволяет говорить о приведенной модели, как модели начального уровня, поскольку получаемые результаты будут существенно зависеть, прежде всего, от временного шага рассматриваемого процесса и размера конечного элемента в области контакта.

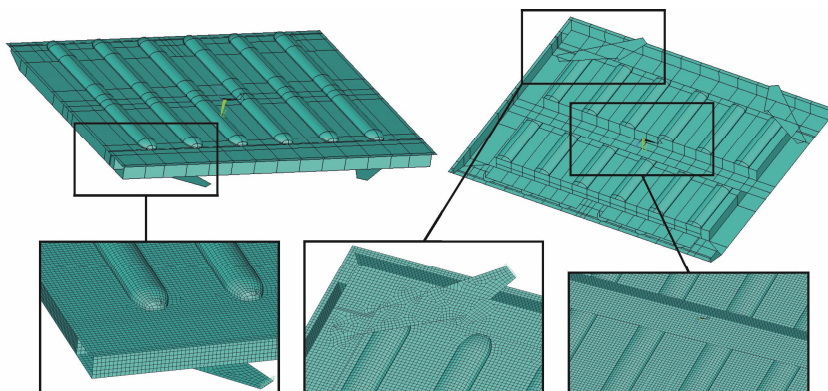


Рисунок 1 – Геометрическая модель крышки люка полувагона и фрагменты регулярной аппроксимации конечными элементами

Для выбора шага итерационного процесса и размера конечного элемента в зоне контакта выполним серию расчетов напряженно-деформированного состояния крышки люка при центральном поперечном ударе падающим телом массой 5 кг с высоты 1 м, варьируя шагом по времени Δt и размером конечных элементов b в зоне контакта.

На рисунке 2, а приведены зависимости эквивалентных напряжений в точке центрального соударения для различных шагов по времени с размером конечного элемента в плане 10^{-2} м. Из графиков видно, что по мере уменьшения временного шага, четко обозначается время ударного взаимодейст-

вия, которое составило порядка 10^{-3} с. Установлено, что при рассмотрении временного шага итерации менее $5 \cdot 10^{-5}$ с, результаты расчетов, в частности напряжений, остаются неизменными.

Анализируя для шага по времени $5 \cdot 10^{-5}$ с результаты расчетов при варьировании размером конечных элементов в области взаимодействия крышки люка с падающим телом (рисунок 2, б), видим, что по мере сгущения сетки конечных элементов наблюдаются характерные колебания напряжений. В то же время, при размере стороны элемента 5 мм и менее, расхождение напряжений практически отсутствует, а максимальное значение напряжений стабилизируется.

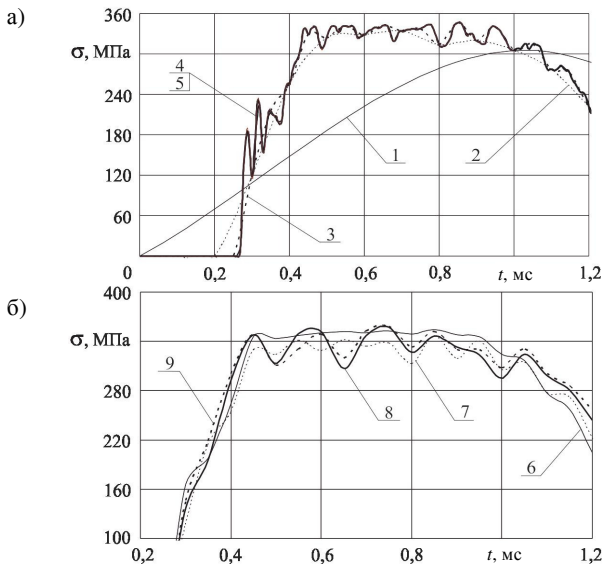


Рисунок 2 – Временные зависимости эквивалентных напряжений в зоне взаимодействия для различных шагов по времени и размеров конечных элементов:

1 – $\Delta t = 10^{-3}$ с; 2 – $\Delta t = 10^{-4}$ с; 3 – $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ с; 4 – $\Delta t = 10^{-5}$ с; 5 – $\Delta t = 10^{-6}$ с;

6 – $b = 0,02$ м; 7 – $b = 0,01$ м; 8 – $b = 0,005$ м; 9 – $b = 0,00125$ м

Таким образом, дальнейшие расчеты выполнялись при размере стороны конечного элемента в области контактного взаимодействия 5 мм и временном шаге $5 \cdot 10^{-5}$ с.

Рассмотрим применение приведенного алгоритма к оценке напряженно-деформированного состояния крышки люка при падении груза массой 150 кг с высоты 3 м [1].

Падающий груз представим сферической формой с заданием свойств, близких к бетону ($\rho = 2500$ кг/м³, модуль упругости $E = 2,7 \cdot 10^{10}$ Па), который

моделируется 8-узловыми объемными конечными элементами SOLID164. Для анализа различных случаев падения груза на закрытую крышку люка плоскость крышки условно разделим на шесть зон (рисунок 3) и в середине каждой определим место падения груза (выполним подготовку конечно-элементной сетки для корректного решения контактной задачи). Анализ прочности крышки люка выполнен по контрольным точкам (см. рисунок 3), для которых рассчитаны эквивалентные напряжения в указанных сечениях.

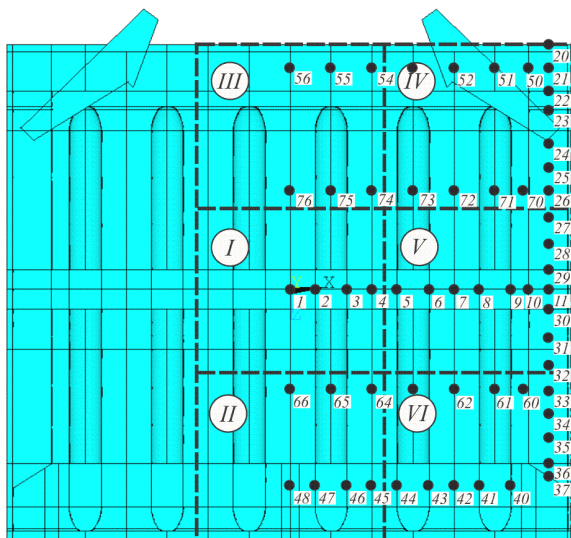


Рисунок 3 – Схема крышки люка с указанием зон для расчетных случаев I–VI и контрольных точек

Для анализа результатов расчета напряженного состояния боковой балки на рисунке 4 сведены графики распределения максимальных эквивалентных напряжений по ее длине (ось абсцисс – положение контрольной точки). Установлено, что наибольший уровень напряжений возникает в случае падения бетонной глыбы в зону V, причем самой нагруженной оказалась зона сочленения боковой и средней балок. В остальных случаях распределения напряжений практически аналогичны друг другу и наиболее нагруженной оказалась область, расположенная от места крепления кронштейна запорного устройства до места соединения боковой и средней балок. Для всех случаев нагружения зафиксированы напряжения, существенно превышающие предел текучести материала. На рисунке 5 приведены зависимости эквивалентных напряжений от времени в контрольных точках 25 и 29 для различных случаев падения груза. Продолжительность приведенных зависимостей сокраще-

на, поскольку для всех расчетных случаев напряжения достигают своего максимума лишь на первом этапе соударения падающего груза с крышкой люка.

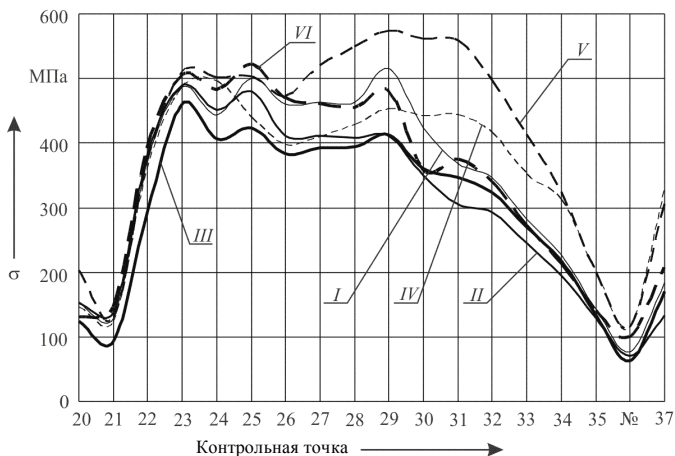


Рисунок 4 – Максимальные эквивалентные напряжения в контрольных точках боковой балки для различных расчетных случаев

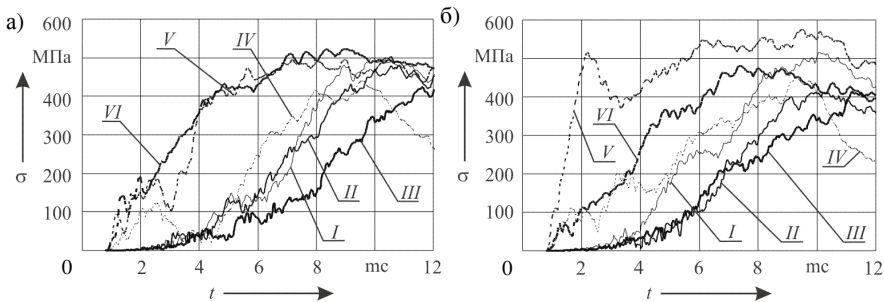


Рисунок 5 – Изменение эквивалентных напряжений в контрольных точках 25 и 29 боковой балки для различных расчетных случаев от времени

Анализируя результаты расчета максимальных эквивалентных напряжений в контрольных точках средней балки, показанные на рисунке 6, видно, что высокий уровень напряжений имеет место в ее среднем сечении, затем, по мере удаления от середины, практически для всех расчетных случаев они снижаются и, по мере приближения к месту соединения с боковой балкой, резко возрастают до максимальных значений, превышающих предел текучести материала. На рисунке 7 приведены зависимости напряжений от времени в контрольных точках 1 и 12 для различных случаев падения груза.

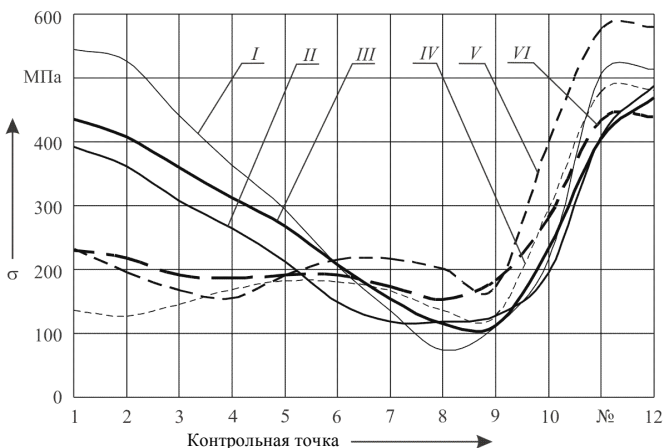


Рисунок 6 – Максимальные эквивалентные напряжения в контрольных точках средней балки для различных расчетных случаев

Результаты анализа напряженного состояния заднего усиливающего профиля (рисунок 8) показали, что характер распределения максимальных эквивалентных напряжений по его длине сопоставим с распределением последних по длине средней балки, где также наблюдается спад напряжений по мере удаления от средней части, и их рост по мере приближения к боковой балке. Для случаев III и IV получены значения, превышающие предел текучести материала. На рисунке 9 приведены зависимости напряжений от времени в контрольных точках 40 и 48 для различных случаев падения груза.

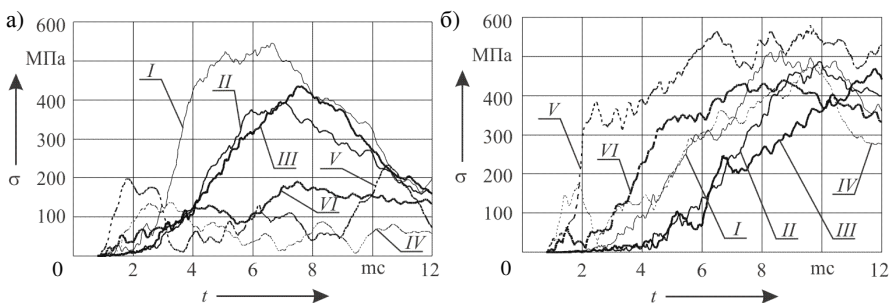


Рисунок 7 – Изменение эквивалентных напряжений в контрольных точках 1 и 12 средней балки для различных расчетных случаев от времени

Распределение максимальных эквивалентных напряжений по длине передней балки приведено на рисунке 10, где виден экстремум для всех случаев нагружения в контрольной точке 51, расположенной в месте установки запор-

ного кронштейна. Здесь уровень напряжений не превышает предела текучести, но по мере приближения к середине балки, при падении груза в зону II, наблюдаются напряжения, достигающие предельного значения.

На рисунке 11 приведены зависимости напряжений от времени в контрольных точках 51 и 56, а на рисунке 12 – максимальные эквивалентные напряжения для различных случаев падения груза. На рисунке 13 показаны зависимости напряжений от времени в контрольных точках 61 и 65 для различных случаев падения груза. Здесь характерно, что при рассмотрении IV режима нагружения максимальные напряжения в контрольной точке 61 реализуются значительно позже начала процесса соударения, после того как миновали экстремумы напряжений в большинстве анализируемых областей.

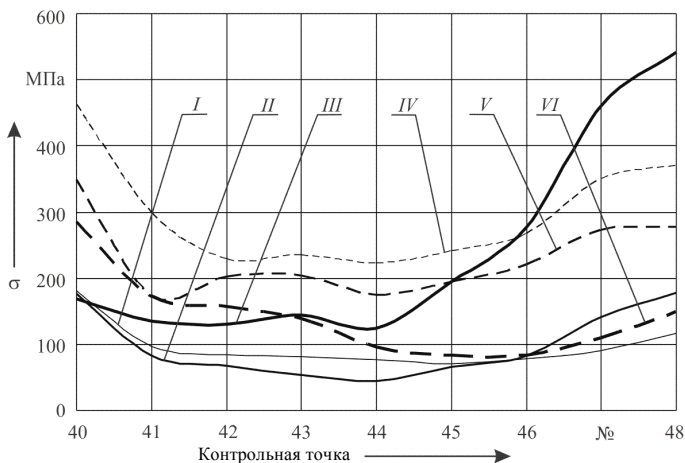


Рисунок 8 – Максимальные эквивалентные напряжения в контрольных точках заднего усиливающего профиля для различных расчетных случаев

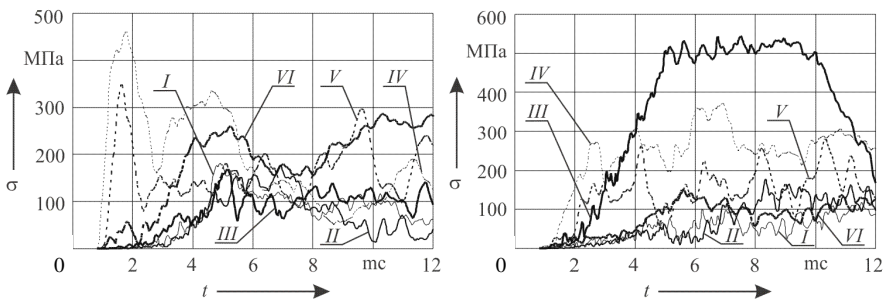


Рисунок 9 – Изменение эквивалентных напряжений в контрольных точках 40 и 48 заднего усиливающего профиля для различных расчетных случаев от времени

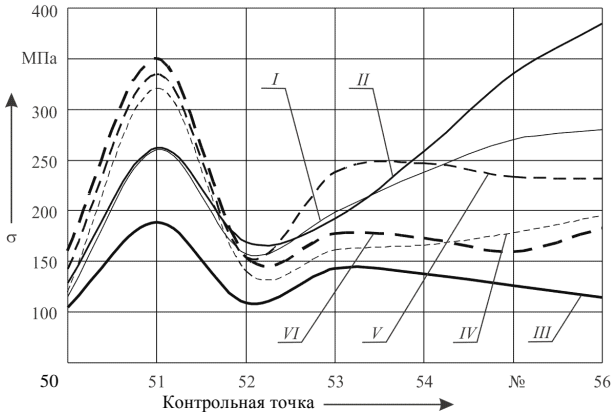


Рисунок 10 – Максимальные эквивалентные напряжения в контрольных точках передней балки для различных расчетных случаев

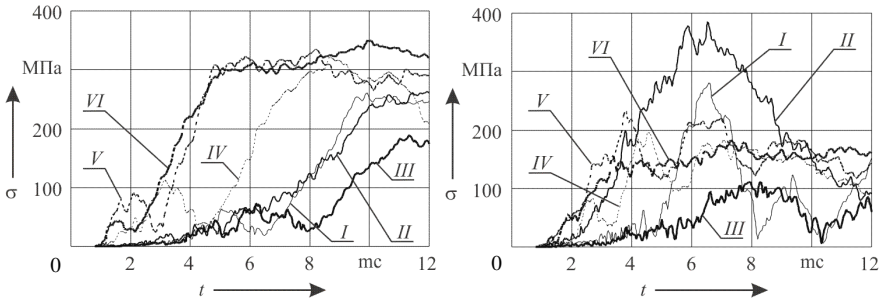


Рисунок 11 – Изменение эквивалентных напряжений в контрольных точках 51 и 56 передней балки для различных расчетных случаев от времени

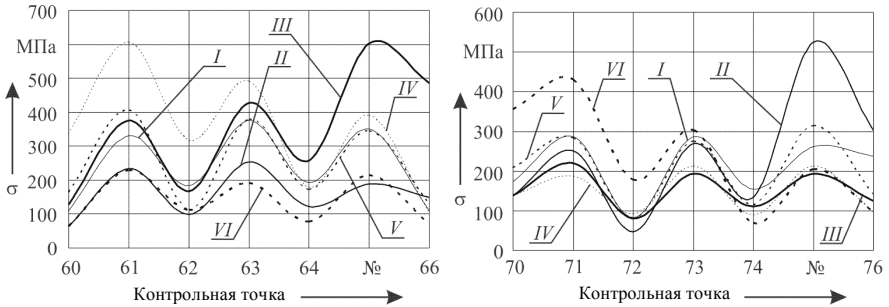


Рисунок 12 – Максимальные эквивалентные напряжения в контрольных точках гофрированного листа для различных расчетных случаев

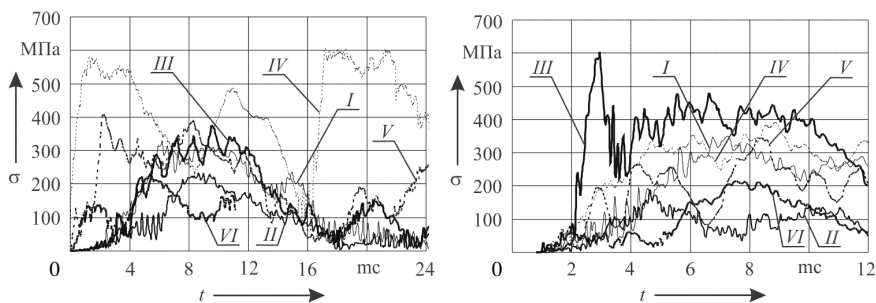


Рисунок 13 – Изменение эквивалентных напряжений в контрольных точках 61 и 65 гофрированного листа для различных расчетных случаев от времени

В целом следует отметить, что при падении кускового груза с характеристиками материала, близкими к бетону, массой 150 кг (сферообразная форма) с высоты 3 м в большинстве конструктивных элементах крышки люка обнаружены значения напряжений, превышающие предел текучести материала, которые носят кратковременный характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2 Оценка технического состояния вагонов, транспортных средств, разработка мероприятий и новой конструкторской документации по восстановлению утраченного ресурса с целью продления срока службы. Отчет о НИР Тема № 3932-В/Ю 1693. № госрегистрации 20053411. Рук. темы В. И. Сенько. – Гомель: БелГУТ, 2005. – 207 с.

3 Сендеров, Г. К. Обеспечение безопасной работы грузовых вагонов / Г. К. Сендеров, Е. А. Поздина, В. Б. Митюхин, Е. С. Бузанова // Железнодорожный транспорт, 2007. – № 3 – С. 45–50.

4 Шевченко, В. П. Проблема схоронності вантажних вагонів на придніпровській залізниці / В. П. Шевченко // Вагонний парк. – 2010 – № 10. – С. 56–57.

A. V. PUTSIATA

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN CONDITION OF THE COVER OF THE SEMICOACH MANHOLE WHEN FALLING PIECES OF CARGO

There have been developed the finite-element models allowing to define the stress-strain condition for the cover of the unloading semicoach manhole when falling pieces of cargo during car loading. Computation of the manhole cover under impact loading recommended by the standard has displayed that its construction mismatches modern standard requirements.

Получено 21.02.2011