

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КАБИНЫ МАШИНИСТА ЭЛЕКТРОВОЗА С СИСТЕМОЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЕГО СТОЛКНОВЕНИИ С МОБИЛЬНЫМ ТРАНСПОРТНЫМ СРЕДСТВОМ

Дана оценка напряженно-деформированного состояния элементов конструкции кабины машиниста локомотива скоростного пассажирского поезда при его столкновении с мобильным транспортным средством с использованием разработанных математических конечно-элементных моделей.

Дано оцінку напружено-деформованого стану елементів конструкції кабіни машиніста локомотива швидкісного пасажирського поїзда при його зіткненні з мобільним транспортним засобом з використанням розроблених математичних скінченно-елементних моделей.

The stressed-strained state of structural elements of a high-speed passenger train locomotive operator's cabin at collision between the train and the mobile transportation facility is estimated using developed mathematical finite-element models.

Актуальною задачею отечественного железнодорожного транспорта является создание подвижного состава нового поколения, в частности электровозов, предназначенных для скоростного (160 – 200 км/ч) пассажирского движения. Вопрос повышения скорости движения неразрывно связан с проблемой безопасности пассажиров и поездной бригады в случае аварийного столкновения поездов или наезда поезда на препятствие. На рис. 1 и рис. 2 показаны последствия аварийных столкновений локомотивов с мобильными транспортными средствами (МТС): столкновение 09.11.2007 г. с прицепом грузовой машины на переезде в Днепропетровской области (рис. 1); столкновение 02.11.2009 г. с бензовозом на переезде в Иркутской области (рис. 2).



Рис. 1



Рис. 2

Современная конструкция электровоза скоростного пассажирского поезда должна быть оборудована эффективными средствами активной защиты для предотвращения аварийных столкновений и системой пассивной безопасности (СПБ), которая при столкновении без активного участия машиниста позволит уменьшить тяжесть последствий, сохранить жизнь и здоровье находящихся в поезде людей. Снижение возникающих при сверхнормативном

ударе продольных сил и ускорений достигается за счет деформации входящих в СПБ специальных жертвенных зон и жертвенных элементов, расположенных в концевых частях электровоза. Поэтому при проектировании скоростного электровоза с СПБ особое внимание должно быть уделено разработке конструкции его концевых частей, в частности кабины машиниста, которая должна отвечать не только требованиям эксплуатационной прочности, но и требованиям пассивной безопасности. На сегодняшний день такие требования и в Украине, и в России определяются только конкретным техническим заданием на разработку кабины машиниста, поскольку соответствующие нормативы и общие технические требования пока отсутствуют.

В странах ЕС с 2008 года обеспечение пассивной безопасности железнодорожного экипажа скоростного и высокоскоростного поезда является обязательным и регламентируется европейским стандартом EN 15227:2008 “Railway applications – Crashworthiness requirements for railway vehicle bodies” [1]. С 2009 года в Российской Федерации разрабатывается, но пока не принят проект “Технические требования к системе пассивной безопасности подвижного состава для пассажирских перевозок железных дорог колеи 1520 мм”.

Согласно европейскому стандарту EN 15227:2008 при разработке пассажирского локомотива с СПБ, кроме обязательных прочностных расчетов конструкции на действие нормативных статических нагрузок, должны быть выполнены расчеты нелинейного деформирования его конструкции при ударных нагрузках в соответствии с тестовыми сценариями столкновений. Создать железнодорожный экипаж, конструкция которого обеспечивала бы защиту пассажиров и поездной бригады для любых видов аварий, невозможно. Поэтому выбор тестовых сценариев основан на результатах анализа статистических данных об аварийных столкновениях, которые наиболее часто возникают на железных дорогах Европы и характеризуются самым высоким уровнем смертей и травм. Согласно данным за 1991 – 1995 гг. доля столкновений локомотива с вагоном составляет 39%, а с препятствием на переезде – 37 % от общего числа аварий. Исходя из этих данных, стандартом EN 15227:2008 определены следующие обязательные тестовые сценарии для экспериментальной и расчетной проверки СПБ:

а) лобовое столкновение двух идентичных поездных составов со скоростью 36 км/ч;

б) лобовое столкновение поездного состава со скоростью 36 км/ч с неподвижным грузовым вагоном массой 80 т;

в) лобовое столкновение поездного состава со скоростью 110 км/ч с крупногабаритным дорожным транспортным средством массой 15 т на переезде;

г) столкновение поездного состава с невысоким препятствием, например, машиной на железнодорожном переезде, животным, мусором.

Первые два сценария характеризуют сверхнормативное ударное воздействие, передаваемое через буфера и жертвенные элементы, установленные на раме локомотива. Эти сценарии являются базовыми для выбора параметров жертвенных элементов. Третий сценарий характеризует удар со скоростью $V = 110$ км/ч в лобовую часть кабины на уровне между подоконным и надоконным брусками и является базовым при определении параметров конструкции кабины машиниста. Четвертый сценарий является базовым для расчета конструкции путеочистителя.

Стандарт EN 15227:2008 не предъявляет конкретных требований по уровню энергопоглощения для элементов СПБ. Обязательным требованием

этого стандарта является сохранение неповрежденным пространства для выживания пассажиров и поездной бригады на протяжении всего времени сжатия жертвенных элементов. Местная пластическая деформация и местный изгиб допустимы при условии, что области такой деформации достаточно ограничены, т.е. такая деформация не ведет к уменьшению пространства для выживания. В кабине машиниста длина такого пространства должна составлять не менее 0,75 м. Среднее значение продольного ускорения в зонах выживания не должно превышать 5 g для сценариев 1 и 2 и 7,5 g для сценария 3.

При моделировании тестовых сценариев столкновения используется модель эталонного поездного состава, которая включает полную трехмерную модель конструкции локомотива с подробным представлением жертвенных элементов в его концевых частях. Обычно только модели первого или первых двух вагонов должны включать в себя детально разработанные модели жертвенных элементов на раме и жертвенных зон в конструкции кузова. Остальные вагоны, входящие в поездной состав, могут быть представлены в виде системы сосредоточенных масс, системы пружин и т.п., которые воспроизводят поведение вагонов в целом.

В европейском стандарте EN 15227:2008 четко определены параметры эталонных препятствий, которые используются при расчетах. В третьем тестовом сценарии дорожное транспортное средство массой $M = 15$ т представлено специальной моделью деформируемого крупногабаритного препятствия, геометрические размеры которой приведены на рис. 3.

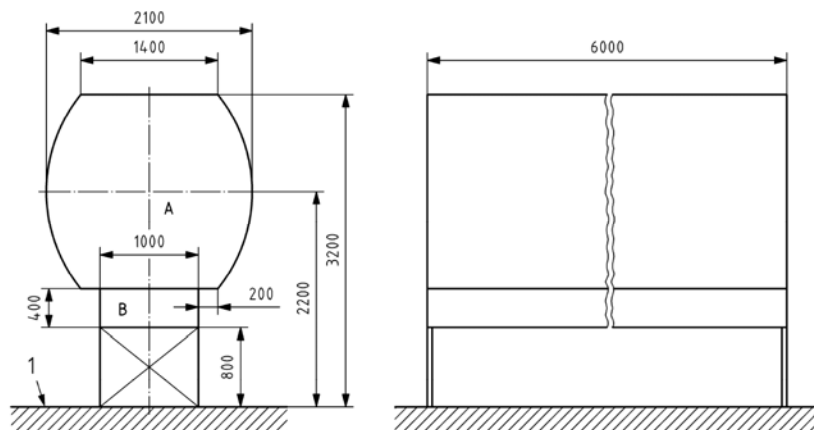


Рис. 3

На рис. 3 использованы следующие обозначения: 1 – головка рельса; А, В – части препятствия.

Центр масс модели препятствия расположен на высоте 1750 мм от уровня головки рельса. Коэффициент трения при движении препятствия по земле равен нулю, а при контакте препятствия с элементами передней части кабины машиниста равен 0,2. Модель препятствия имеет постоянную плотность в поперечном направлении (перпендикулярно движению локомотива) и постоянную жесткость в продольном направлении (вдоль движения локомотива). Характеристики жесткости эталонного деформируемого препятствия определяются путем решения специальной задачи об ударе со скоростью 30 м/с по центру препятствия монолитной правильной однородной сферой массой 50 т, диаметром 3 м. Центр масс сферы расположен на высоте 1,5 м над уровнем головки рельса. Сфера имеет только одну степень свободы – в продольном

направлении. Эталонная модель деформируемого крупногабаритного препятствия должна иметь характеристику жесткости, которая, как минимум, соответствует характеристике кривой “продольная сила F_x – продольное перемещение сферы x ”, изображенной на рис. 4.

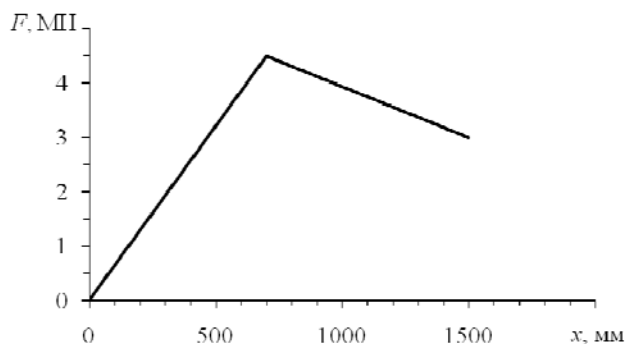


Рис. 4

При моделировании третьего сценария столкновения центральная сцепка на торце локомотива не учитывается. На рис. 5 показана схема расположения локомотива и препятствия согласно третьему европейскому тестовому сценарию аварийного столкновения $V = 110$ км/ч.

Сценарий 3: $V=110$ км/ч, $m=15$ т



Рис. 5

В российском проекте “Технические требования к системе пассивной безопасности подвижного состава для пассажирских перевозок железных дорог колеи 1520 мм”, разработанном ОАО “ВНИКТИ” и ОАО “ВНИИЖТ” в 2010 г., по степени обеспечиваемой защиты СПБ подразделяются следующим образом.

Уровень 0: пассивная безопасность подвижного состава обеспечивается в пределах скоростей столкновения до 10 км/ч. Этот уровень защиты не предусматривает установку дополнительных жертвенных элементов, обустройство жертвенных зон, кроме штатных поглощающих аппаратов сцепных устройств и штатных буферов, с суммарной энергоемкостью до 0,3 МДж.

Уровень I: на подвижном составе устанавливаются специальные жертвенные элементы СПБ. Для этого уровня защиты, который должен обеспечить энергопоглощение не менее 2 МДж, рассматриваются следующие тестовые сценарии столкновения подвижного состава с препятствием:

- сценарий 1: столкновение со скоростью 72 км/ч с мобильным транспортным средством массой 10 т на железнодорожном переезде;

- сценарий 2: столкновение со скоростью 36 км/ч с загруженным грузовым вагоном массой 80 т на железнодорожном пути.

Уровень II: на подвижном составе устанавливаются специальные защитные энергопоглощающие устройства СПБ. Для этого уровня защиты, который должен обеспечить энергопоглощение не менее 4 МДж, рассматриваются такие тестовые сценарии столкновения подвижного состава с препятствием:

- сценарий 1: столкновение со скоростью 110 км/ч с мобильным транспортным средством (МТС) массой 10 т на железнодорожном переезде;
- сценарий 2: столкновение со скоростью 36 км/ч с загруженным грузовым вагоном массой 80 т на железнодорожном пути.

Выбор таких тестовых сценариев основан на результатах анализа аварийных столкновений на железных дорогах России в 2001 – 2008 гг., согласно которым 86% всех аварий происходит на железнодорожных переездах.

В отличие от европейского стандарта EN 15227:2008 в российском проекте препятствие считается недеформируемым, допускающим свободное (без трения) перемещение вдоль направления движения поезда. Центр масс препятствия расположен на равном удалении от правой и левой нитей рельсовой колеи на высоте 2,0 м от уровня головки рельса (УГР).

Для сценария 1 препятствие в виде МТС массой 10 т (грузовой автомобиль, панелевоз, автоцистерна) представляет собой плоскую вертикальную стенку с фронтальными размерами 4,0×4,0 м, расположенную перпендикулярно направлению движения поезда, а также цилиндр диаметром 3,0 м и длиной 4,0 м, продольная ось которого расположена горизонтально поперек направлению движения поезда.

Ориентируясь на требования технического задания на разработку кабины машиниста скоростного электровоза ЭП20 массой 126 т, предложена концепция его пассивной защиты. Согласно этой концепции при аварийном столкновении локомотива с грузовым вагоном массой 80 т со скоростью 36 км/ч в результате согласованной работы элементов СПБ может быть погашена кинетическая энергия не менее 2 МДж без превышения допустимого уровня (5g) продольного ускорения в зоне безопасности (при уровне продольного ускорения 5g значение контактного усилия составляет 6,2 МН). Концепция основана на предположении, что в передней части рамы локомотива располагается срезаемая при сверхнормативном ударе автосцепка, которая не препятствует работе СПБ в аварийной ситуации, а рама электровоза позволяет без возникновения в ее элементах остаточных деформаций обеспечить эффективное срабатывание СПБ. Конструкция кабины выдерживает нормативные нагрузки, а при аварийном столкновении, в первую очередь, разрушаются жертвенные элементы и жертвенная зона кабины. Согласно концепции большая часть энергии поглощается за счет пластического деформирования жертвенных элементов, установленных в концевой части рамы электровоза, которая является основной конструкцией, воспринимающей продольный удар. При сверхнормативном ударном воздействии контактное усилие не превышает уровня 4,2 МН.

Разработана конструкция модульной кабины машиниста электровоза ЭП20 с СПБ, в состав которой входят:

- два жертвенных элемента, установленных в концевой части рамы;
- жертвенная зона, расположенная в передней части кабины;

- зона безопасности в задней части кабины, обеспечивающая необходимое пространство для выживания локомотивной бригады.
- Элементы СПБ модульной кабины машиниста электровоза показаны на рис. 6.

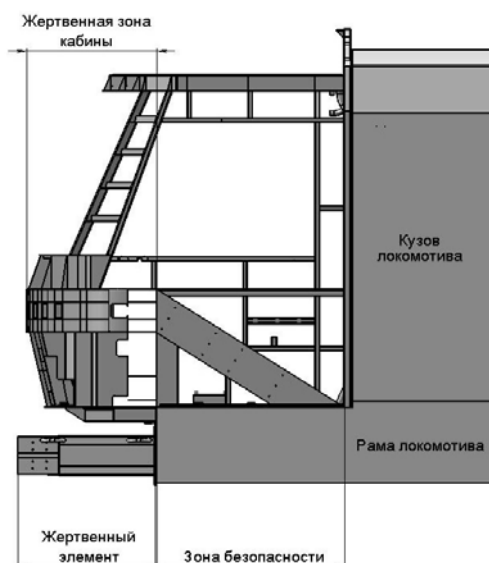


Рис. 6

В результате конечно-элементного математического моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов конструкции кабины машиниста при рассматриваемом сценарии столкновения получено, что за счет работы СПБ можно обеспечить поглощение энергии порядка 2,1 МДж при продольной деформации 700 мм без превышения допустимого уровня (5g) продольного ускорения в зоне безопасности [2].

Для разработанной конструкции кабины машиниста проведено исследование НДС ее элементов при сверхнормативных ударах, которые соответствует тестовому сценарию 1 российского проекта для уровня I пассивной безопасности. Рассмотрен худший вариант препятствия – автоцистерна. С помощью метода конечных элементов выполнены расчеты и проведен анализ упругопластического деформирования разработанной конструкции каркаса кабины с учетом и без учета жертвенных элементов при ударе недеформируемым цилиндром (бойком) массой $M = 10$ т со скоростью $V = 72$ км/ч.

Схема взаимодействия элементов модульной кабины машиниста с бойком при ударе приведена на рис. 7.

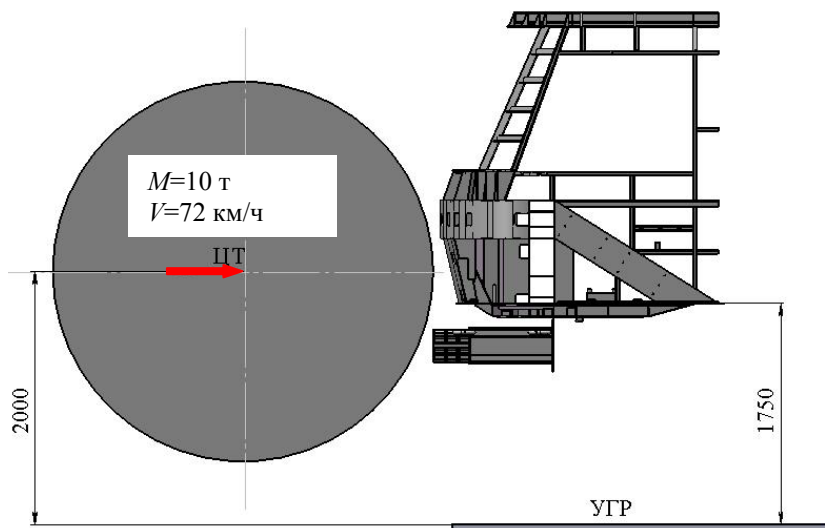


Рис. 7

В качестве граничных условий приняты условия жесткой заделки заднего торцового сечения конструкции жертвенного элемента, элементов крепления каркаса кабины к кузову электровоза и элементов крепления передней части зоны безопасности кабины к раме электровоза, а также поверхности рассматриваемого фрагмента рамы, на которой с помощью болтового соединения крепится каркас кабины.

Решение поставленной задачи получено с использованием результатов двух расчетов по оценке упругопластического деформирования:

- каркаса кабины (без учета жертвенных элементов, установленных в концевой части рамы) при ударе недеформируемым цилиндром массой 10 т со скоростью 72 км/ч (расчет 1);
- жертвенного элемента, установленного в концевой части рамы электровоза, при рассматриваемом ударе (расчет 2).

Расчеты 1 и 2 выполнены с использованием трехмерных конечно-элементных математических моделей, разработанных для анализа динамического контактного взаимодействия между элементами конструкции кабины с СПБ и бойком с учетом геометрической и физической нелинейностей, динамического упрочнения стали в зависимости от скорости удара, а также возможного разрушения элементов конструкций СПБ и кабины при ударе. При моделировании использованы специальные пластинчатые элементы с четырьмя или тремя узлами, каждый из которых имеет по три линейных и угловых перемещения, скорости и ускорения относительно осей узловой системы координат элемента. Эти элементы позволяют учитывать большие пластические деформации. Боек моделировался объемными конечными элементами с восьмью узлами, каждый из которых имеет по три линейных перемещения, скорости и ускорения. Между бойком и исследуемыми конструкциями, а также между элементами самих конструкций каркаса и жертвенного элемента учитывалась возможность контакта типа “автоматический, поверхность – поверхность”.

В качестве начальных условий задана в момент времени $t = 0$ скорость центра масс бойка $V=72 \text{ км/ч}$.

Конечно-элементная схема каркаса кабины представлена на рис. 8.

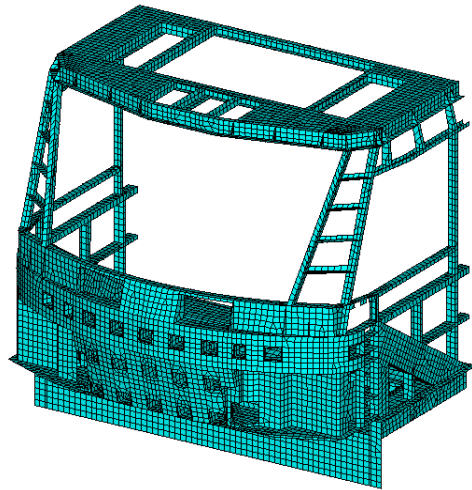


Рис. 8

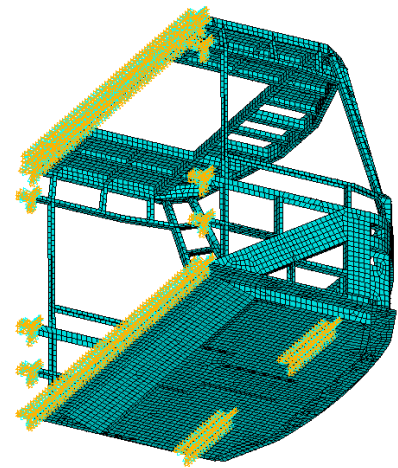


Рис. 9

Она содержит 18695 узлов и 18877 конечных элементов.

На рис. 9 показаны граничные условия, принятые для расчета 1 НДС каркаса кабины при ударе.

Результаты расчета 1 представлены на рис. 10 – 15.

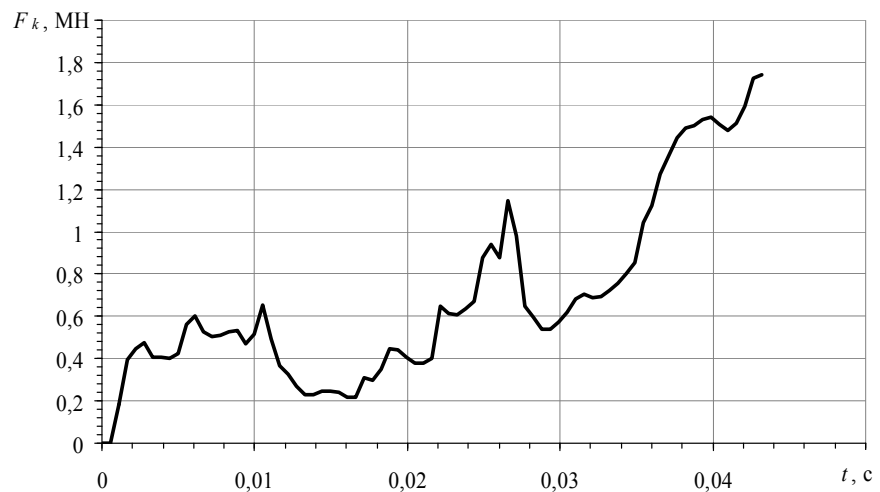


Рис. 10

На рис. 10 приведена зависимость от времени контактного усилия F_k между бойком и конструкцией каркаса. На рис. 11 показано деформированное состояние, а на рис. 12 – НДС элементов конструкции каркаса кабины в характерные моменты времени (см. рис. 10).

Результаты расчета 2 представлены на рис. 13 – 15. На рис. 13 приведена зависимость контактного усилия F_e между бойком и жертвенным элементом от времени. На рис. 14 показано НДС жертвенного элемента (дан вид конструкции в разрезе центральной продольно-вертикальной плоскостью симметрии) в разные моменты времени (см. рис. 13).

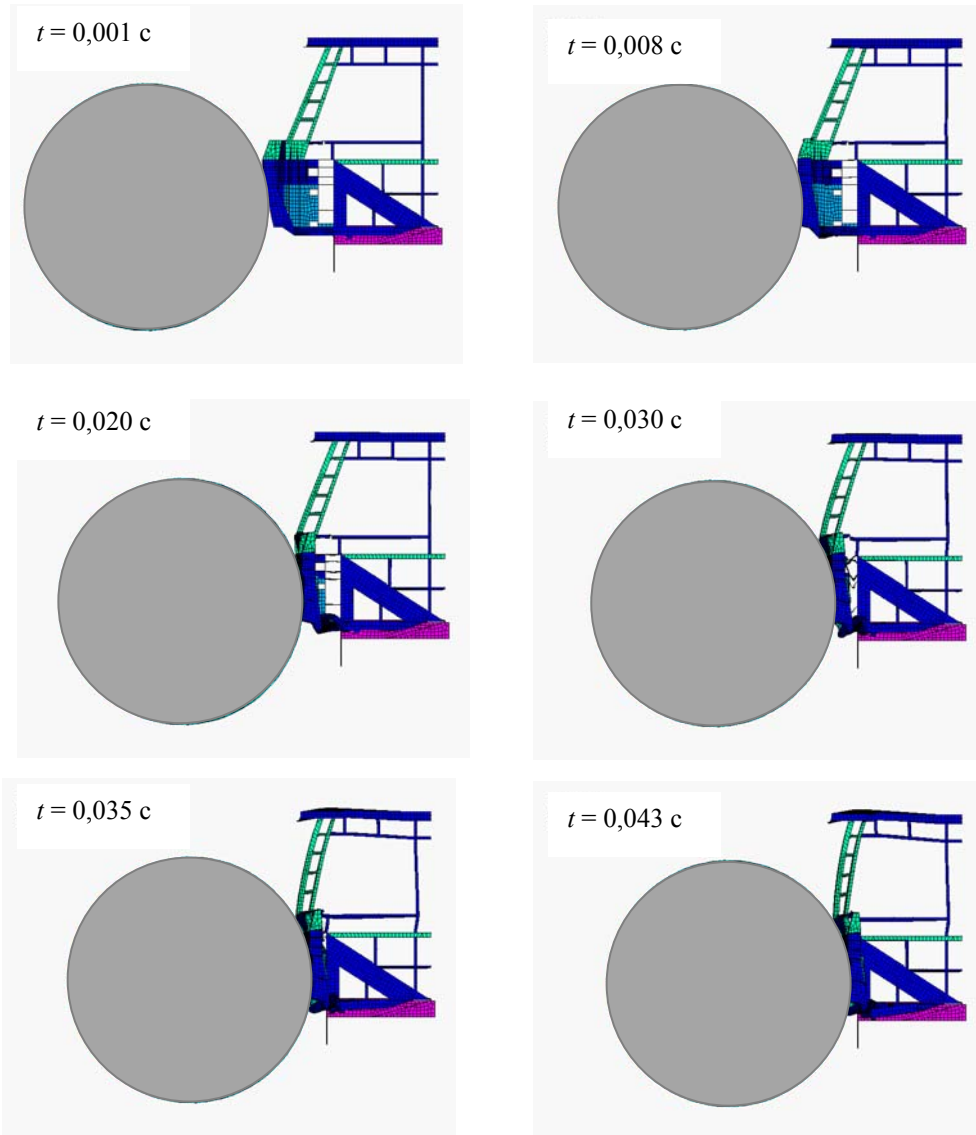
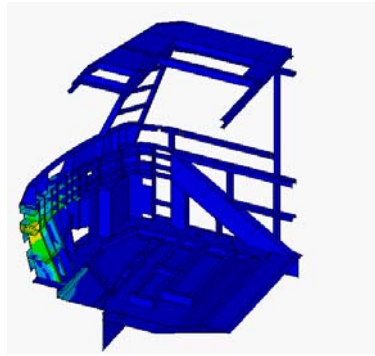
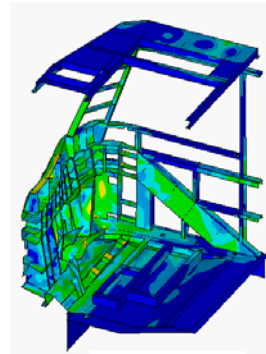


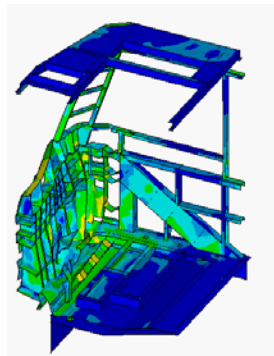
Рис. 11



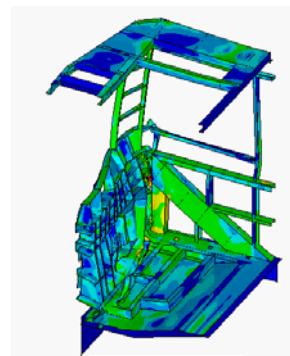
$t = 0,001 \text{ c}$



$t = 0,020 \text{ c}$



$t = 0,026 \text{ c}$



$t = 0,043 \text{ c}$

Рис. 12

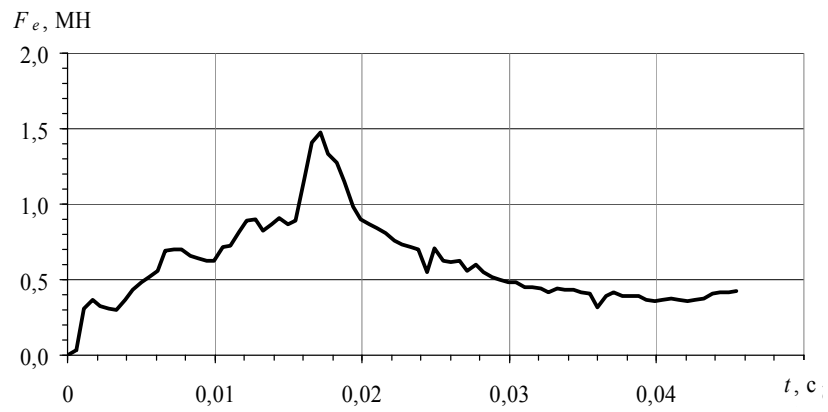


Рис. 13

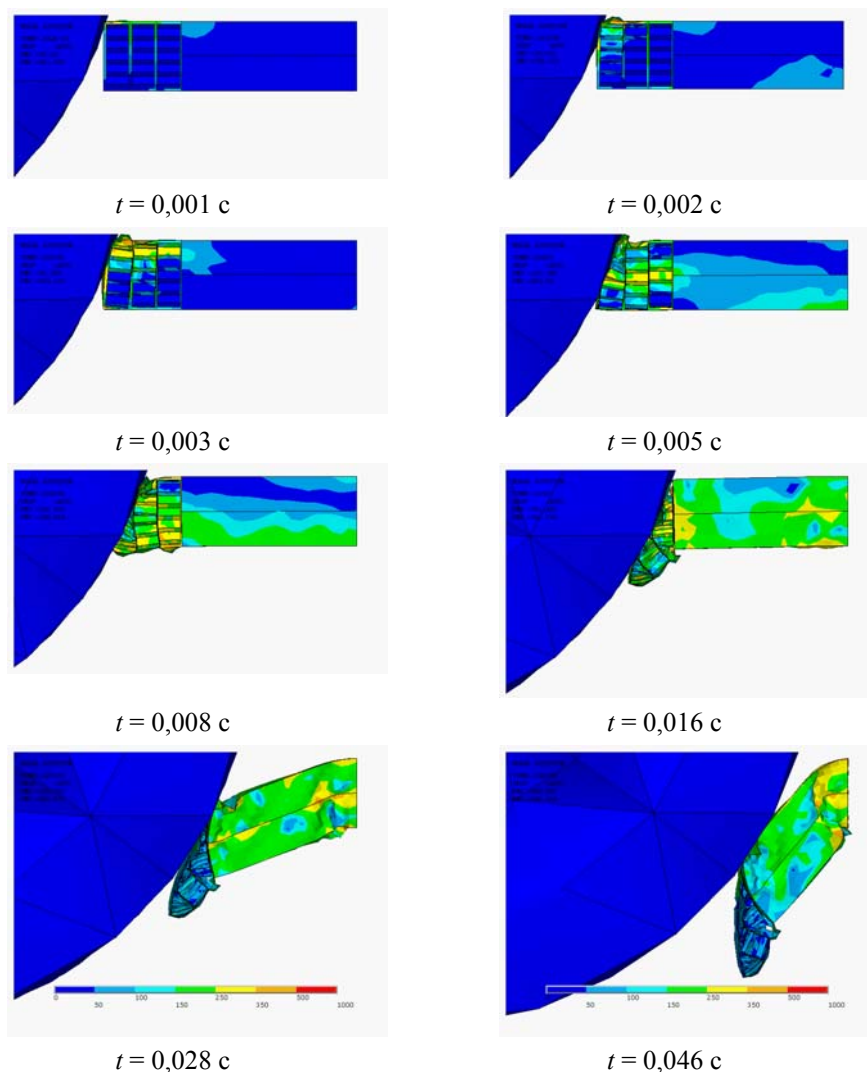


Рис. 14

На рис. 15 показана зависимость энергии E_e , поглощаемой в результате деформации жертвенного элемента, от продольного перемещения u_b центра масс бойка при ударе

$$E_e = \frac{M(v^2(t) - V^2)}{2},$$

где $v(t)$ – скорость бойка в момент времени t .

В результате выполненного анализа установлено, что за счет пластического деформирования и разрушения конструкции одного жертвенного элемента может быть поглощена кинетическая энергия $E_e \approx 0,45$ МДж при продольном перемещении бойка на 700 мм. Поскольку в концевой части электровоза параллельно установлены два одинаковых жертвенных элемента, то в результате их совместной работы в аварийной ситуации может быть погло-

цена энергия порядка 0,9 МДж при продольном перемещении бойка на 700 мм и порядка 1 МДж при продольном перемещении бойка на 800 мм.

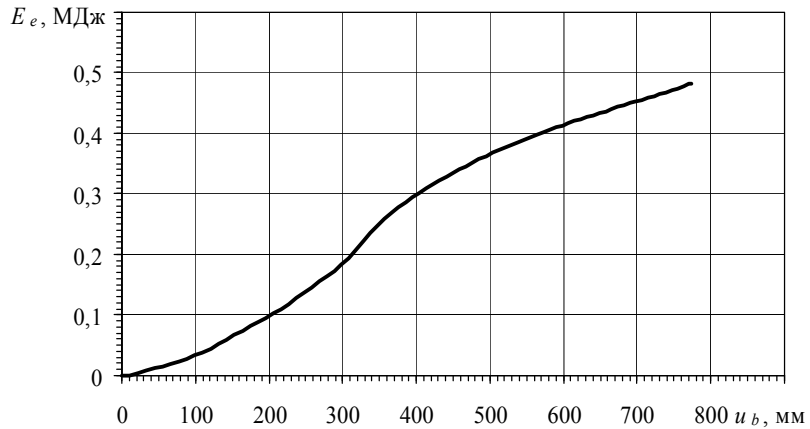


Рис. 15

Следует отметить, что при рассматриваемом ударе жертвенный элемент работает в основном на изгиб, а не на сжатие в продольном направлении. А это существенным образом сказывается на уровне энергии, поглощаемой при его деформации.

С использованием результатов расчетов 1 и 2 получены:

- суммарная силовая характеристика деформации каркаса кабины с учетом жертвенных элементов, установленных в концевой части рамы (рис. 16);
- общее энергопоглощение при совместной работе жертвенных элементов, установленных в концевых частях рамы электровоза, и жертвенной зоны каркаса кабины машиниста (рис. 17).

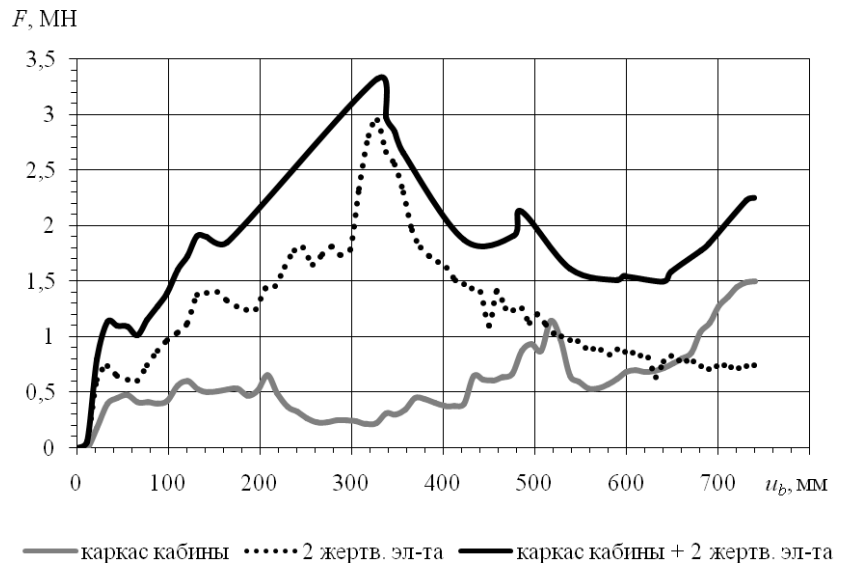


Рис. 16

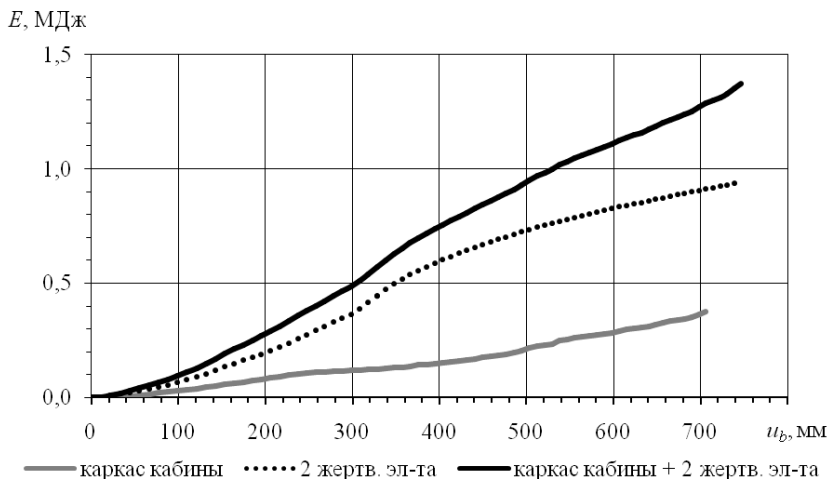


Рис. 17

На рис. 16 и 17 приведены соответственно зависимости контактных усилий и энергии, поглощаемой при деформации конструкции каркаса кабины (линия “каркас кабины”) согласно расчету 1, двух жертвенных элементов (линия “2 жертв. эл-та”) согласно расчету 2, а также при совместной деформации жертвенных элементов и конструкции каркаса (линия “каркас кабины + 2 жертв. эл-та”) от продольного перемещения центра масс бойка. Как видно из полученных результатов, при ударе недеформируемым цилиндром массой 10 т со скоростью 72 км/ч СПБ разработанной конструкции кабины электровоза может обеспечить поглощение энергии удара не более 1,5 МДж в результате перемещения бойка до 800 мм без превышения допустимых уровней контактного усилия (4,2 МН) и продольного ускорения (5g) в зоне безопасности кабины. На уровне поглощаемой энергии существенным образом сказывается то, что удар приходится не только в лобовую часть каркаса кабины, но и в жертвенные элементы, которые при этом работают, в основном, на изгиб. При этом энергопоглощение за счет практически максимальной деформации жертвенной зоны каркаса кабины не превышает 0,5 МДж. Пространство для выживания машиниста (зона безопасности) не испытывает значительных пластических деформаций (см. рис. 11 – 12), однако требования рассмотренного тестового сценария 1 по уровню энергопоглощения (2,0 МДж) не выполняются.

Проведенные исследования показали, что низко расположенный от головки рельса недеформируемый цилиндр не является адекватной моделью реального МТС в виде автоцистерны при аварийном столкновении (см. рис. 1). Как показывают результаты европейских исследований по проекту SAFETRAIN [3, 4], на которых основан стандарт EN 15227:2008, при столкновении с МТС только 30 % кинетической энергии поглощается за счет деформации элементов конструкции локомотива, в первую очередь кабины, а остальные 70% энергии поглощаются за счет деформации препятствия. При этом модель крупногабаритного препятствия в стандарте EN 15227:2008 учитывает, что основной удар приходится по кабине, а не по жертвенным элементам, установленным в концевой части рамы локомотива (см. рис. 5).

Таким образом, для тестового сценария столкновения с МТС скоростного локомотива, предназначенного для движения по колею 1520 мм, необходима разработка адекватной модели деформируемого препятствия. При этом должно быть учтено, что основной удар приходится по каркасу кабины, а не по жертвенным элементам, установленным в концевой части рамы локомотива, и за счет деформации препятствия поглощается около 70% энергии удара.

Соответственно этому должны быть откорректированы записанные в Российском проекте “Технические требования к системе пассивной безопасности подвижного состава для пассажирских перевозок железных дорог колеи 1520 мм” требования по энергопоглощению.

В целом, учитывая схожесть проблем, связанных с организацией скоростного и высокоскоростного пассажирского движения в странах постсоветского пространства, представляется целесообразным создание единого нормативного стандарта по пассивной безопасности для всего пространства колеи 1520 мм на основе анализа типичных для этого пространства аварийных ситуаций с учетом накопленного мирового опыта и уже действующего европейского стандарта EN 15227:2008.

1. EN 15227. Railway applications – Crashworthness requirements for railway vehicle bodies. – Brussel : EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2008. – 37 p.
2. Ушкалов В. Ф. Разработка кабины машиниста электровоза ЭП20 с системой пассивной безопасности при аварийных столкновениях с препятствием на железнодорожном пути / В. Ф. Ушкалов, М. Б. Соболевская, И. Б. Теличко // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – 2010. – № 5 (147). – Частина 2. – С. 67 – 72.
3. Пассивная безопасность пассажирского подвижного состава // Железные дороги мира. – 2007. – № 6. – С. 61 – 65.
4. Совершенствование локомотивов в соответствии с требованиями к безопасности при столкновениях // Железные дороги мира. – 2007. – № 8. – С. 57 – 63.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 01.04.11,
в окончательном варианте 16.05.11