

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ СИСТЕМЫ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЗАДАЧЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЛОКОМОТИВА В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

Красюков Н.Ф.

*АО «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт
подвижного состава», г. Коломна*

Ключевые слова: столкновение локомотива с препятствием; система пассивной безопасности; конструкционная защита; устройство поглощения энергии.

Аннотация. На примере моторвагонного подвижного состава рассмотрена задача приближенной и уточненной оценки проектных параметров устройства поглощения энергии как элемента конструкционной защиты состава поезда при аварийном соударении головного вагона (локомотива) с препятствием на пути следования.

Повышение безопасности железнодорожного подвижного состава в аварийных ситуациях продолжает оставаться в числе критически важных задач, требующих рассмотрения в рамках национальной программы предупреждения техногенных катастроф [1].

Для предварительной оценки эффективности устройств поглощения энергии (УПЭ) в широком диапазоне скоростей столкновения, значений массы поезда и препятствия с учетом ограничений на максимальное ускорение (перегрузку) и силу удара предлагается следующая приближенная методика расчетов, в которой поезд и препятствие рассматриваются как твердые тела. При этом вводятся следующие допущения:

- поезд массой m_1 , состоящий из одной головной единицы (локомотив, головной вагон), движется со скоростью v_1 и сталкивается с препятствием массой m_2 , стоящим на пути следования поезда, $v_2 = 0$ (рис. 1);

- поезд и препятствие считаются недеформируемыми, энергия удара поглощается за счет деформации специального УПЭ (сминаемого буфера), размещенного в передней части головной единицы;

- соударяемые объекты – поезд и препятствие в процессе столкновения движутся прямолинейно;

- для соударяемых объектов силы сопротивления со стороны опорной поверхности отсутствуют;

- удар считается абсолютно неупругим, после соударения поезд и препятствие движутся с одинаковой скоростью v_{sum} ;

- УПЭ имеет идеальную жесткопластическую характеристику со значением начала пластического деформирования при некотором предельном значении силы удара $f = f_{\text{max}}$, которая остается постоянной на всей длине l рабочего участка диаграммы.

Жесткопластическая диаграмма УПЭ представляется идеальной зависимостью силы от деформации сжатия. При разработке конкретных

конструкций УПЭ с заданными параметрами представленную диаграмму следует рассматривать как ориентир, определяющий наилучший ее вариант.

В соответствии с принятой расчетной схемой (рис. 1) и ограничениями на ускорение подвижных единиц $a_1^{1)}$ и силу удара $f^{2)}$ предварительная оценка проектных параметров УПЭ и ожидаемых параметров поведения головной единицы состава при столкновении с препятствием предлагается выполнять в следующем порядке.

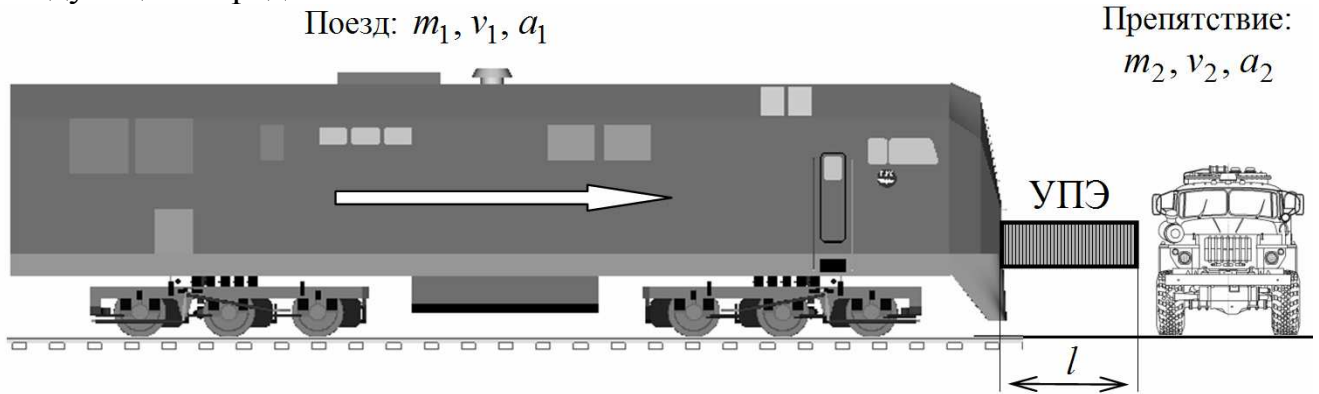


Рис. 1. Расчетная схема столкновения головного вагона поезда с препятствием (мобильным транспортным средством)

1. Суммарная скорость v_{sum} состава и препятствия после неупругого соударения (по закону о сохранении количества движения):

$$v_{\text{sum}} = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2).$$

2. Изменение скорости состава dv в результате соударения:

$$dv = m_2 (v_2 - v_1) / (m_1 + m_2).$$

3. Длительность соударения при $|a_1| = 5g$ (ограничение по ускорению), где g – ускорение свободного падения:

$$dt = |dv| / |a_1|.$$

4. Суммарная сила на кузов головной единицы состава со стороны УПЭ:

$$f = m_1 |a_1|.$$

5. Ускорение препятствия:

$$|a_2| = f / m_2.$$

6. Минимальная длина рабочего участка диаграммы УПЭ (разность между его длиной до и после соударения):

$$l_{\text{min}} = v_1 dt - (|a_1| + |a_2|) dt^2 / 2.$$

Если в расчете (шаг 4) f превысит f_{max} , то принимается $f = f_{\text{max}}$ (вступает в силу ограничение по максимальной силе), и выполняются следующие шаги расчета:

¹⁾ $|a_1| \leq 5g$ по условиям безопасности при столкновении с транспортным средством на железнодорожном переезде или грузовым вагоном на станционных путях при маневрировании.

²⁾ $f \leq f_{\text{max}}$, где f_{max} – максимальная продольная нагрузка на кузов по условиям его прочности и устойчивости.

7. Ускорения состава и препятствия (абсолютные значения):

$$|a_1| = f / m_1, \quad |a_2| = f / m_2.$$

8. Длительность соударения:

$$dt = dv / |a_1|.$$

9. Уточненное значение минимальной длины рабочего участка диаграммы деформирования:

$$l_{\min} = v_1 dt - (|a_1| + |a_2|) dt^2 / 2.$$

10. Энергия, поглощаемая при ударе для любого из рассматриваемых вариантов ограничений:

$$U = f \cdot l_{\min}.$$

Величину энергопоглощения U , полученную по представленной методике, можно подтвердить энергетическим методом расчета по уравнению:

$$U = (m_1 v_1^2 + m_2 v_2^2 - (m_1 + m_2) v_{\text{sum}}^2) / 2,$$

отражающему изменение кинетической энергии системы «поезд – препятствие» в процессе соударения.

По представленной методике выполнен вычислительный эксперимент, в котором с учетом заданных ограничений относительно ускорения и силы соударения определялась требуемая энергоемкость УПЭ, при этом варьировались масса головной единицы m_1 , ее начальная скорость v_1 и масса препятствия m_2 . Результаты оценки длины $l_{\min}$ рабочего участка диаграммы деформирования УПЭ для головной единицы массой $m_1 = 80$ т, ограничениях $a_{\max} = 5g$ и $f_{\max} = 2,5$ МН при начальной скорости столкновения v_1 от 12 до 120 км/ч (от 3,33 до 33,3 м/с) и массе препятствия m_2 от 5 до 100 т представлены на рис. 2.

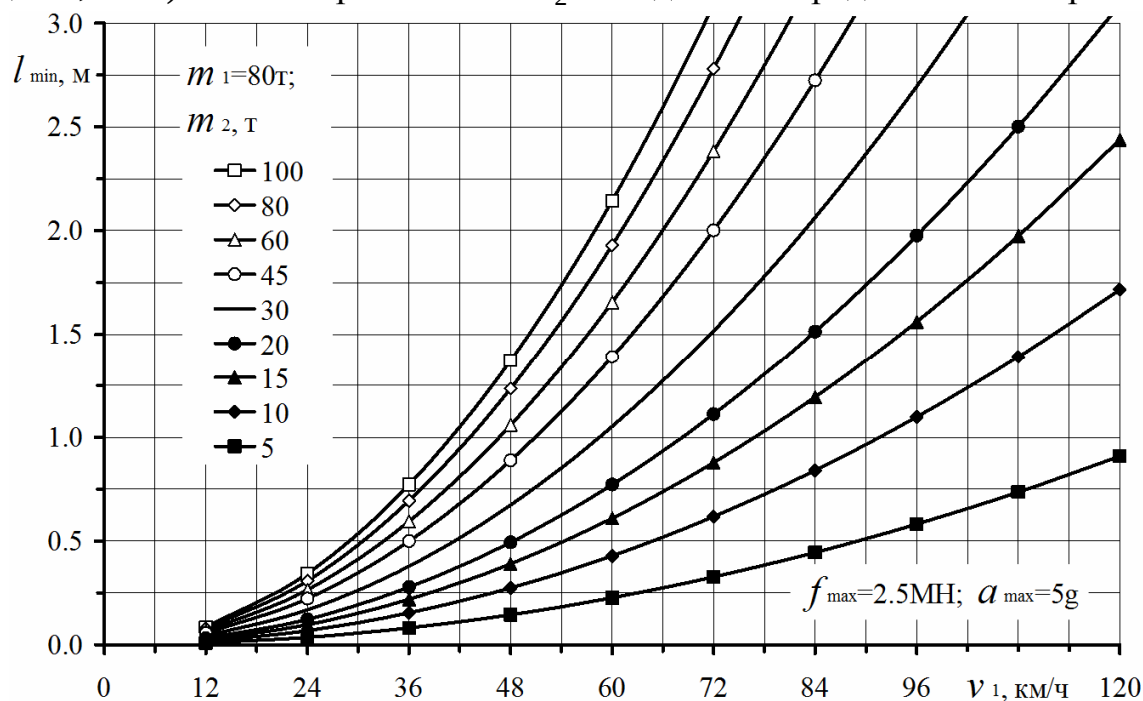


Рис. 2. Длина $l_{\min}$ рабочего участка диаграммы деформирования УПЭ в зависимости от скорости соударения v_1 и массы препятствия m_2 при массе головной единицы состава $m_1 = 80$ т и силе удара $f_{\max} = 2,5$ МН

Из графиков (рис. 2) видно, как с увеличением массы состава m_1 или уменьшением массы препятствия m_2 уменьшается требуемая энергоемкость и, соответственно, проектная длина УПЭ.

Предварительная оценка на основе модели твердых тел для состава из многих вагонов оказывается наиболее информативной, если для расчета в качестве массы состава принять массу только головного вагона (локомотива). Такая оценка дает несколько завышенное значение ускорений головного вагона и как оценка сверху (с некоторым запасом) может использоваться при разработке УПЭ системы конструкционной защиты состава.

Данное положение подтверждается расчетами с применением моделей, более детально описывающих продольную динамику поезда при его соударении с препятствием.

Уточненные расчетные значения параметров УПЭ при столкновении подвижного состава с препятствием могут быть получены на основе учета продольной динамики состава поезда.

Моделирование продольной динамики в составе поезда выполнено с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Методика расчета рассмотрена на примере столкновения с препятствием электропоезда из десяти вагонов (рис. 3), у которого головной вагон оснащен устройством поглощения энергии с упругопластической диаграммой деформирования (рис. 4).

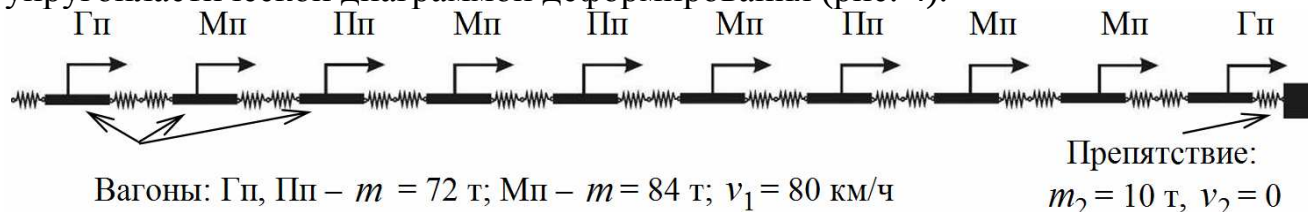


Рис. 3. Расчетная схема столкновения с препятствием состава из десяти вагонов: двух головных прицепных (Гп), трех прицепных промежуточных (Пп) и пяти моторных промежуточных (Мп)

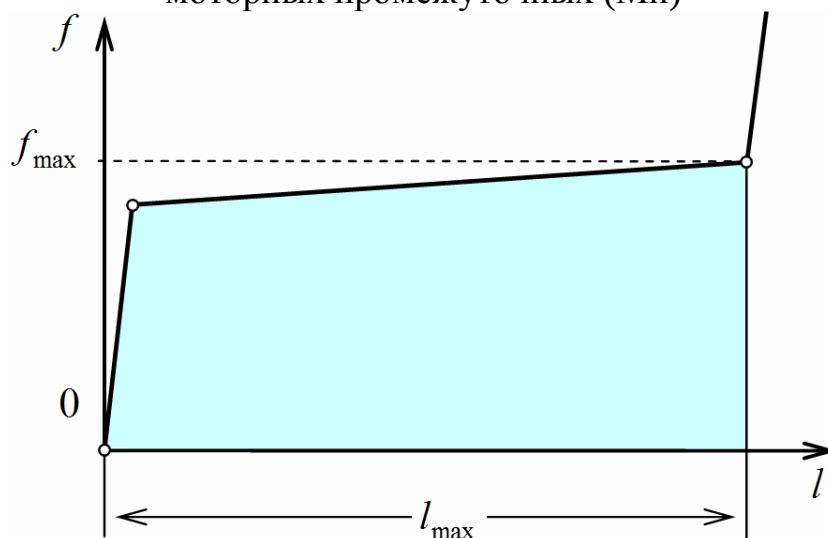


Рис. 4. Диаграмма деформирования устройств поглощения энергии в системе «поезд – препятствие»

Метод основан на следующих дополнительных предположениях и допущениях:

– применена одномерная динамическая модель состава, учитывающая продольные жесткости кузовов вагонов и сцепных устройств с учетом нелинейных характеристик поглощающих аппаратов (рис. 5) и диаграммы деформирования УПЭ;

– значения продольной жесткости вагонов определены квазистатическим расчетом МКЭ с использованием трехмерных моделей кузовов, учитывающих основные несущие элементы их конструкции;

– поглощающие аппараты межвагонных сцепных устройств в начальный момент столкновения находятся в нейтральном положении;

– в начальный момент соударения все единицы состава поезда имеют одинаковую скорость v_1 .

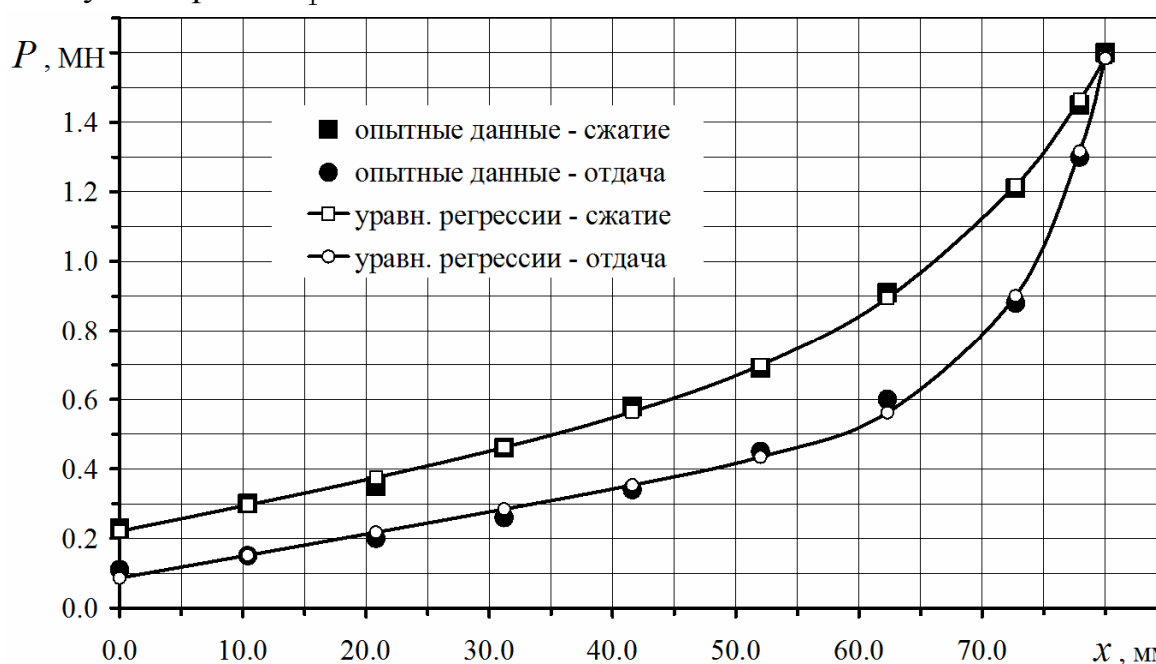


Рис. 5. Диаграмма деформирования поглощающего аппарата Р-5П сцепного устройства

В модели состава каждый вагон представлен стержневым элементом с продольной жесткостью, соответствующей продольной жесткости вагона при нагружении его по оси автосцепок. Значения продольных жесткостей вагонов получены отдельными расчетами, выполненными в программном комплексе MSC.Marc [3].

На расчетной схеме (рис. 3) отрезками линий обозначены вагоны, а пружинами между вагонов – поглощающие аппараты сцепных устройств. Крайняя правая пружина представляет свойства УПЭ. Темный квадрат справа обозначает сосредоточенную массу, которая в расчетной схеме имитирует препятствие.

Диаграмма УПЭ (рис. 4) имеет левый и правый участки с высокой жесткостью деформирования и средний податливый участок, обеспечивающий большие необратимые деформации при ограниченной величине силы сжатия 2,5 МН, энергоемкость при сжатии на длине 1 м составляет приблизительно 2 МДж. Диаграмма, близкая к указанной, реализована в устройстве [2].

Динамические силовые характеристики резинометаллического поглощающего аппарата Р-5П (рис. 5) для использования в расчетах аппроксимировались по опытным данным уравнениями вида:

$$P_{сж} = a_0 + a_1 x + a_2 \exp(a_3 x), \quad P_{отд} = b_0 + b_1 x + b_2 \exp(b_3 x)$$

где $P_{сж}$, $P_{отд}$ – значения силы, приложенной к поглощающему аппарату при его сжатии и отдаче соответственно; x – изменение линейных размеров поглощающего аппарата; $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ – эмпирические коэффициенты, подбором которых методом наименьших квадратов достигается лучшее совпадение с опытными данными.

Задача движения системы «поезд – препятствие» сводилась к численному интегрированию по времени уравнений вида:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{r},$$

где $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ – соответственно матрицы масс, демпфирования и жесткости системы МКЭ; $\mathbf{u}$ – вектор узловых перемещений, $\dot{\mathbf{u}} = \partial \mathbf{u} / \partial t$ – вектор узловых скоростей, $\ddot{\mathbf{u}} = \partial^2 \mathbf{u} / \partial t^2$ – вектор узловых ускорений модели; $\mathbf{r}$ – вектор узловых нагрузок.

Для интегрирования использовались методы Хаболта (Houbolt) и Ньюмарка (Newmark). Оба метода являются неявными и используют условия динамического равновесия системы на момент времени $t + \Delta t$, для которого состояние еще неизвестно, но в более ранние моменты времени состояние системы полностью определено:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}_{t+\Delta t} + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}_{t+\Delta t} = \mathbf{r}_{t+\Delta t}. \quad (1)$$

Разностные формулы этих методов позволяют преобразовать систему дифференциальных уравнений (1) для шага интегрирования $t + \Delta t$ к системе линейных алгебраических уравнений вида:

$$\tilde{\mathbf{K}} \cdot \mathbf{u}_{t+\Delta t} = \tilde{\mathbf{r}}_{t+\Delta t},$$

где $\tilde{\mathbf{K}}, \tilde{\mathbf{r}}_{t+\Delta t}$ – соответственно эффективная матрица жесткости и эффективный вектор нагрузки на шаге интегрирования по времени $t + \Delta t$.

При расчете соударения как переходного процесса использована форма уравнения (1) в приращениях по перемещениям. На каждом шаге интегрирования по времени нелинейные перемещения уточнялись методом Ньютона (Newton), дополненного процедурой обеспечения глобальной сходимости, основанной на применении локально ограниченного оптимального шага приращения перемещений.

В качестве результатов расчета представлены графики изменения по времени скоростей отдельных вагонов поезда и препятствия (рис. 6), которые показывают, что в начальной фазе процесса соударения до момента времени 0,1 с, когда удар фактически уже произошел (скорости препятствия и головного вагона сравнялись), нагруженными практически являются только два вагона в голове состава. Остальные вагоны ударную нагрузку еще не восприняли.

При рассмотрении динамического поведения вагонов на более длительном интервале времени можно наблюдать распространение ударной волны от головы состава к его концу, отражение волны и ее обратное движение к головному вагону. Процесс движения волны сопровождается постепенным уменьшением

амплитуд ускорений и сил в междвагонных связях, что обусловлено рассеиванием энергии в поглощающих аппаратах сцепных устройств и конструкционным демпфированием. Используемые для оценки параметров системы пассивной безопасности максимальные уровни динамических параметров реализуются в начальный период столкновения, и для их выявления достаточно выполнить исследования динамики состава только на начальной фазе, когда наибольшие динамические нагрузки испытывают только головной вагон и вагон, следующий за ним.

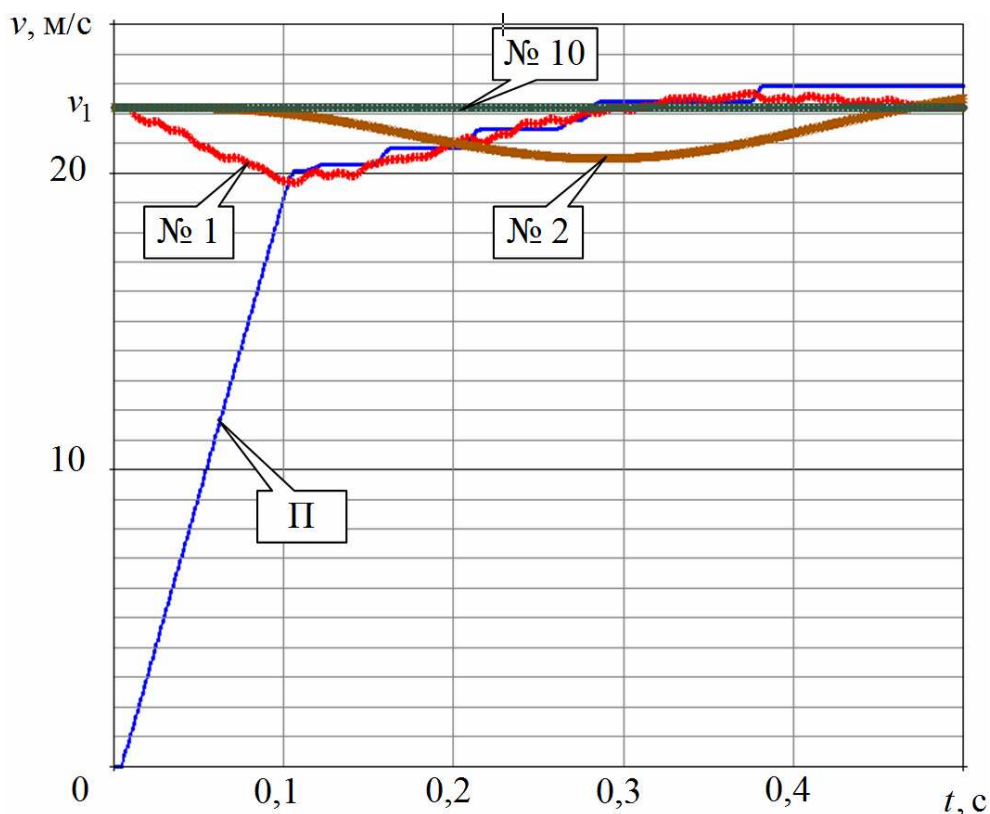


Рис. 6. Графики изменения начальной скорости движения вагонов № 1, 2, 10 и препятствия (П) в течение первых 0,5 с от начала соударения

Разработанная уточненная методика расчета соударения поезда с препятствием позволяет моделировать динамические процессы в его составе, оценивать скорости и ускорения единиц состава, внутренние силы в междвагонных нелинейных связях. Возможен учет реальных диаграмм деформирования УПЭ, полученных экспериментально при разрушающих испытаниях. Методика позволяет моделировать динамические процессы в составе с разрушаемыми устройствами поглощения энергии и вязкоупругими буферами, размещенными между вагонами. Механические характеристики кузовов единиц подвижного состава могут быть имитированы с высокой точностью. При необходимости в динамической модели могут быть отражены особенности нагружения состава в режимах тяги, разгона, торможения, учтены условия движения по пути с уклонами и неровностями.

Список литературы

1. Предупреждение техногенных катастроф // Махутов Н.А., Гаденин М.М., Земцов С.П., Косов В.С., Красюков Н.Ф., Оганьян Э.С., Малышев Н.И., Мельников В.И. // Транспорт: наука, техника, управление. ВИНТИ РАН, 2009. № 11. С. 31–34.

2. Модуль для гашения энергии при соударении транспортных средств: пат. 2476339 Российская Федерация. 2011.
3. MSC.Marc User's Guide. 2005.

Сведения об авторе:

Красюков Николай Федорович – инженер (АО «ВНИКТИ»), г. Коломна.

**THE SIMULATION OF RIGID BODY SYSTEMS' DYNAMIC BEHAVIOR IN THE
LOCOMOTIVE STRUCTURAL PROTECTION PROBLEM IN AN EMERGENCY
SITUATION**

Krasyukov N.F.

Keywords: locomotive collision with an obstacle; passive safety system; structural protection; energy absorption device.

Abstract. On the example of multiple units there is considered the problem of an approximate and amended estimate of design parameters of an energy absorption device as an element of the structural protection of a train set during an accidental collision of a leading car (locomotive) with an obstacle on its route.

References

1. Prevention of technogenic disasters // Makhutov N.A., Gadenin M.M., Zemtsov S.P., Kossov V.S., Krasyukov N.F., Oganyan E.S., Malyshev N.I., Melnikov V.I. // Transport: nauka, tehnika, upravlenie. VINITI RAN, 2009. No. 11. P. 31–34.
2. Energy dissipation module during collisions of vehicles: Pat. 2476339 Russian Federation. 2011.
3. MSC.Marc User's Guide. 2005.