

Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде автомобиля

Ирина Вадимовна Демьянушко, Олег Вадимович Титов,
Павел Сергеевич Михеев, Илья Анатольевич Карпов

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ);
г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Одним из эффективных средств снижения тяжести последствий дорожно-транспортных происшествий (ДТП) на автомобильных дорогах является установка дорожных ограждений (ДО) различного типа. Надежность ДО определяется способностью сопротивляться разрушению при ударе автомобиля и сохранять свою функциональность для различных случаев наезда. Анализ существующих зарубежных и отечественных методов моделирования процессов столкновений показал, что предельным состоянием конструкций ДО при ударе автомобиля обычно считается достижение какого-либо предельного значения механических характеристик материала ДО. Моделирование разрушения элементов ДО, а также оценка их работы после достижения материалом предельных характеристик в момент локализации деформаций связаны с необходимостью учета разрушения в физико-математических моделях материала ДО, что необходимо для объективной оценки работы конструкций ДО как при проектировании, так и при сертификационном анализе.

Материалы и методы. В качестве объекта исследования выбраны барьерные и фронтальные ограждения. Для достижения высокой точности результатов применен подход с валидацией моделей по схеме «материал – деталь – изделие». С целью построения участка истинной диаграммы на участке локализации деформации был использован феноменологический закон упрочнения Хоккетта и Шерби. Оценка разрушения производилась по критерию эффективных пластических деформаций, а также с помощью модели накопления поврежденности GISSMO. Валидация разработанных отдельных элементов конструкций ограждений проводилась на основе стендовых испытаний.

Результаты. Определены основные параметры моделей материалов и модели накопления поврежденности GISSMO, разработаны валидированные модели ключевых элементов исследуемых конструкций ограждений. Выполнены полномасштабные виртуальные испытания исследуемых конструкций ограждений с использованием разработанных валидированных элементов, которые показали хорошую сходимость с натурным экспериментом.

Выводы. В результате анализа выявлено, что наибольшей точностью в описании разрушения элементов конструкций дорожных ограждений обладает подход с применением модели накопления поврежденности GISSMO. Для разработки валидированных моделей конструкций ограждений целесообразно использовать обратный метод и проводить валидацию отдельных элементов посредством стендовых испытаний.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дорожное ограждение, валидация, численный эксперимент, стендовые испытания, метод конечных элементов (МКЭ), цифровая модель, истинная диаграмма деформирования, модель накопления поврежденности GISSMO, критерий разрушения

Благодарности. Авторы выражают благодарность организациям ООО «ТехноДор», АО «АСК» за предоставленные материалы, в том числе по натурным испытаниям изделий и элементам для исследования. Работа выполнена при содействии Федерального дорожного агентства (Росавтодор) и Фонда содействия инновациям (№ 47ГРТЦС10-D5/56182).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Демьянушко И.В., Титов О.В., Михеев П.С., Карпов И.А. Цифровое моделирование разрушения в элементах дорожных ограждений при ударном наезде автомобиля // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1896–1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1896-1919

Автор, ответственный за переписку: Олег Вадимович Титов, gaqui4@yandex.ru.

Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision

Irina V. Demiyanyushko, Oleg V. Titov, Pavel S. Mikheev, Ilya A. Karpov

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI); Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. One of the effective ways of reducing the severity of consequences of road traffic accidents is the use of road barriers. The ability to withstand failure and maintain functionality across various collision scenarios determines the reliability of a barrier. An analysis of existing methods for modelling collision processes showed that the ultimate state of the structures

of the impact site during a vehicle impact is usually considered to be the achievement of some ultimate value of the mechanical characteristics of the impact site material. Modelling the failure of road barrier elements, as well as the assessment of their operation after the material reaches its limiting characteristics at the moment of deformation localization, are associated with the need to take into account the failure in material models, which is necessary for an objective assessment of the operation road barrier structures, both during design and during certification analysis.

Materials and methods. Barrier and frontal guardrails were selected as the object of the study. To achieve high accuracy in the results, an approach with validation based on the material – component – product scheme was applied. To construct the true stress-strain curve beyond the strength limit was used the phenomenological hardening law of Hockett and Sherby. Damage assessment was carried out using the effective plastic strain criterion, along with the GISSMO damage accumulation model. The identification of material and damage model parameters was performed using the inverse modelling method.

Results. The main parameters of the material models and the GISSMO damage accumulation model were determined, and validated models of the main elements of the studied barriers were developed. Full-scale virtual crash-tests of the studied barriers were carried out using the developed validated elements, which showed good convergence with the full-scale experiment.

Conclusions. As a result of the research, it was revealed that the approach using the GISSMO damage accumulation model has the greatest accuracy in describing the failure of structural elements of road barriers. To develop validated models of barriers, it is advisable to use the inverse method and validate individual elements through bench tests.

KEYWORDS: road barrier, validation, numerical experiment, bench test, finite element method (FEM), digital model, true stress-strain curve, damage accumulation model GISSMO, failure criteria

Acknowledgements. The authors express their gratitude to the organizations TechnoDor, ASK for the provided materials and elements for the study. The work was carried out with the assistance of the Federal Road Agency (Rosavtodor) and the Foundation for Assistance to Innovations (No. 47GRTCS10-D5/56182).

FOR CITATION: Demiyanyushko I.V., Titov O.V., Mikheev P.S., Karpov I.A. Digital modelling of failure of road barrier elements under impact of vehicle collision. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1986-1919. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1986-1919 (rus.).

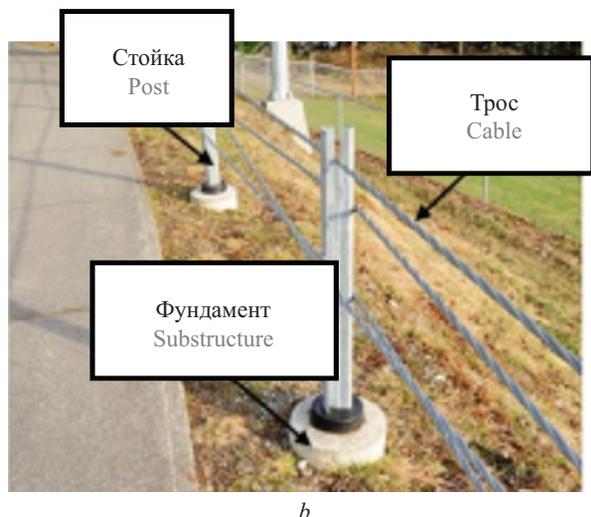
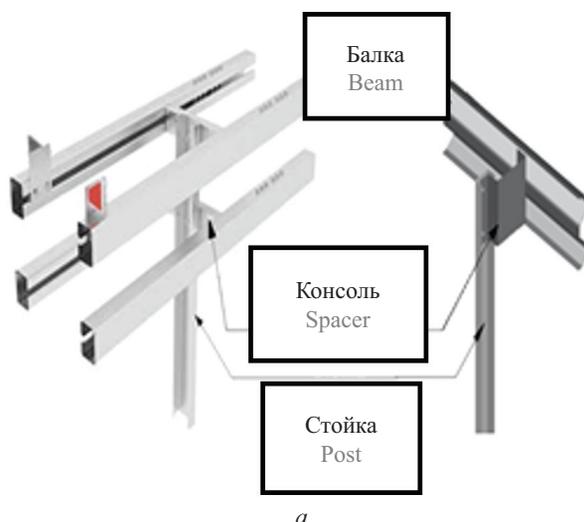
Corresponding author: Oleg V. Titov, gaqui4@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача в области проектирования и строительства автомобильных дорог — обеспечение безопасности дорожного движения. Во многом это решается путем установки удерживающих дорожных ограждений (ДО) различного типа, являющихся эффективным средством снижения тяжести дорожно-транспортных происшествий (ДТП) [1–6]. Существующие конструкции ДО в соответствии с ГОСТ 33127–2014 условно разделяют на деформируемые и недеформируемые. К деформируемым относятся (рис. 1): барьерные (БДО), тросовые (ТДО), фронтальные (ФО) и мобильные фронтальные ограждения (ОМФ) [7–9]. К недеформируемым — парапетные бетонные (железобетонные) ограждения.

В настоящей работе рассматриваются деформируемые конструкции ДО, которые наиболее распространены на дорогах общего пользования. Основные несущие конструктивные элементы деформируемых ДО изготавливаются из тонколистового проката различных марок стали.

В рассматриваемых конструкциях большая часть энергии удара наезжающего автомобиля рассеивается за счет пластических деформаций, трения, разрушения элементов ДО или их комбинации. Особое внимание следует уделить процессам разрушения, которые приводят к изменению связей в системе, что часто ведет к утрате способности конструкции выполнять свои функции (рис. 2). Однако в некоторых случаях поглощение энергии удара при разрушении в ряде конструкций ДО используется направленно путем устройства



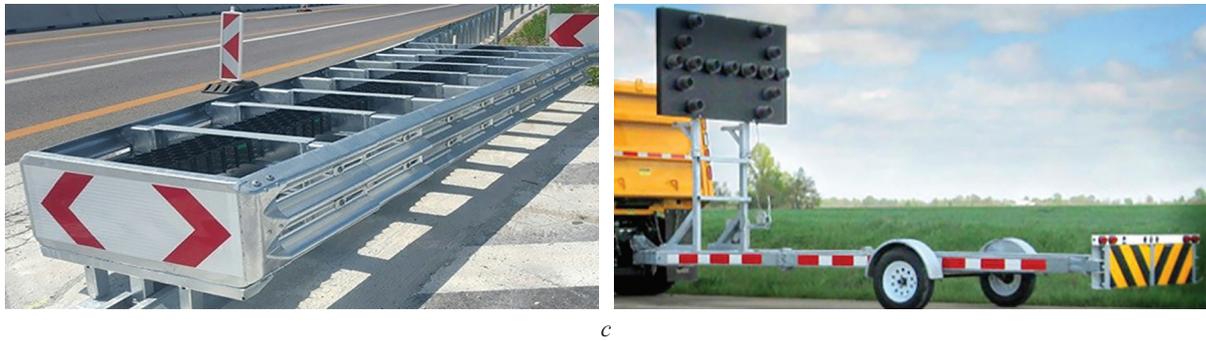


Рис. 1. Основные виды деформируемых ДО: *a* — барьерное ограждение; *b* — тросовое ограждение; *c* — фронтальное и мобильное фронтальное ограждения

Fig. 1. Various deformable road barriers: *a* — guardrail barrier; *b* — cable barrier; *c* — front and mobile front barrier

в ДО конструктивных элементов с так называемым прогнозируемым разрушением (рис. 3).

В случае, показанном на рис. 2, в результате разрыва секции балки в процессе натурных испытаний произошел переезд автобуса через ограждение. Данное разрушение свидетельствует о несоответствии конструкции нормативным требованиям Технического регламента Таможенного союза ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог». Такой вид разрушения относится к неконтролируемым.

Для случаев, показанных на рис. 3, специальные устройства частично вносят в процедуру разрушения положительный эффект. Так, введение концентратора напряжений в виде надреза стойки ТДО (рис. 2, *a*) приводит к сохранению рабочей высоты тросов за счет отсоединения стоек от основания дороги при ударе автомобиля, что обеспечивает безопасность работы. Для использования процесса поглощения энергии удара в элементы конструкций (на рис. 2, *b* показан элемент ФО) вводятся специальные концентраторы напряжений (разрезы), геометрия которых обуславливает направление, усилие раскрытия и скорость роста трещин. Такой тип разрушения относится к прогнозируемому.

При разработке конструкций ДО с целью сокращения времени на проектирование, доводку и

сертификацию в настоящее время широко применяются методы цифрового моделирования процессов наезда автомобиля на ДО, основанные на комбинации численных методов — метода конечных элементов (МКЭ) и метода конечных разностей (МКР), которые реализованы в современных программных комплексах нелинейной динамики и инженерного анализа [7–16]. Для повышения точности и адекватности результатов цифрового моделирования, в частности моделирования процессов прогнозируемого и неконтролируемого разрушения, требуется располагать экспериментально обоснованными (валидованными) параметрами, входящими в применяемые физико-математические модели материалов, включая истинные диаграммы деформирования и соответствующие модели разрушения, а также валидованными моделями основных элементов конструкций ДО. Для валидации необходимо проведение правильно поставленных натурного и виртуального испытаний, результаты которых сравниваются между собой.

Анализ существующих зарубежных и отечественных методов моделирования процессов столкновений показал, что предельным состоянием конструкций ДО при ударе автомобиля обычно считается достижение какого-либо предельного значения меха-

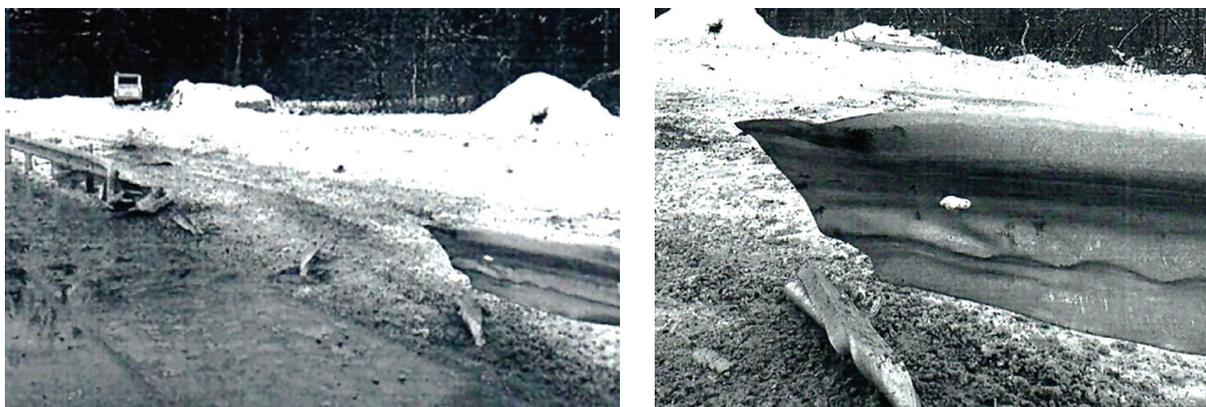


Рис. 2. Разрыв балки БДО при проведении полномасштабных натурных испытаний

Fig. 2. Rupture of guardrail barrier beam during full-scale crash test

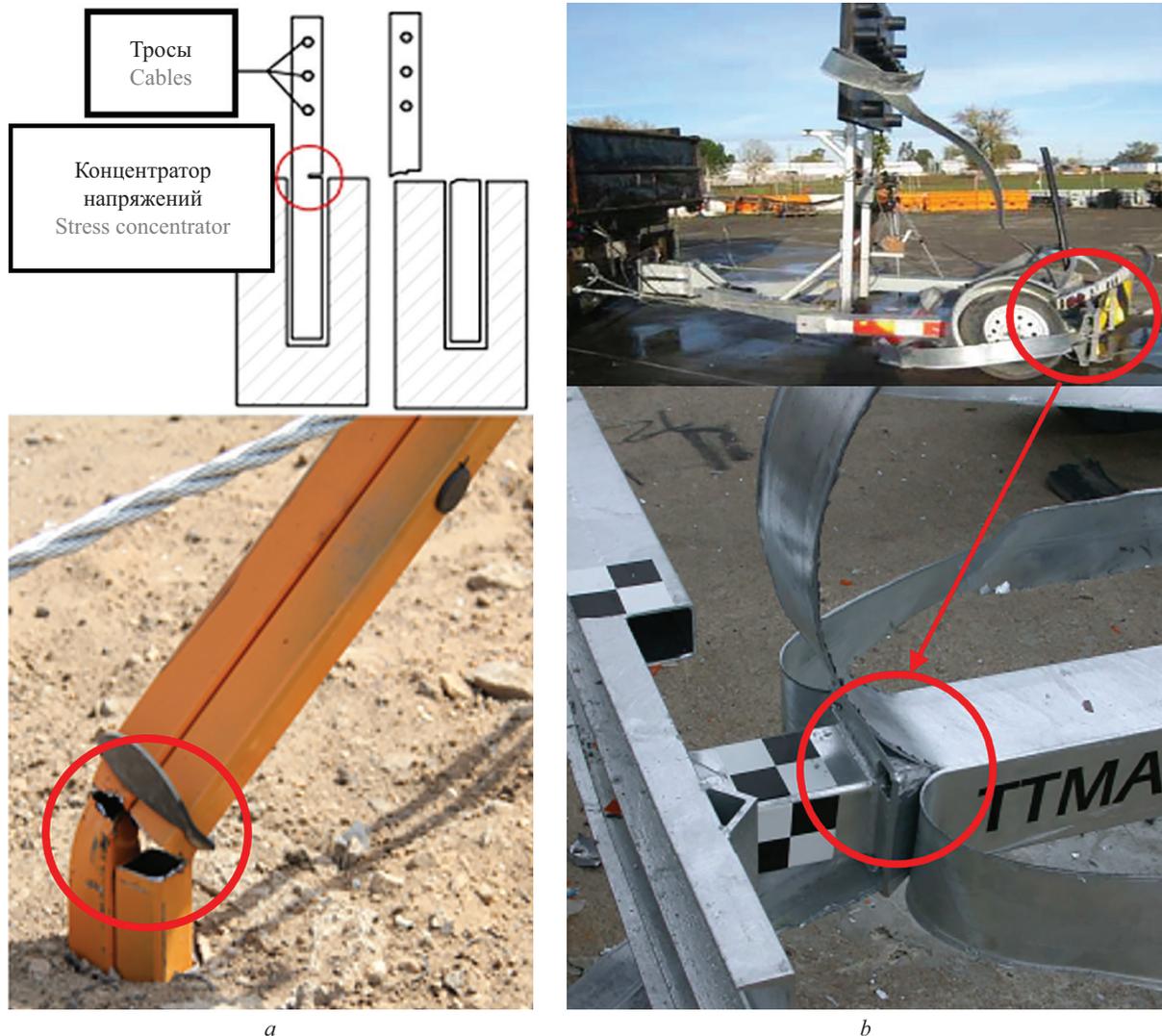


Рис. 3. Дорожные ограждения, включающие элементы прогнозируемого разрушения: *a* — стойки тросового ограждения с надрезом [8]; *b* — разрезные стержни фронтальных ограждений

Fig. 3. Road barriers components with operating failure: *a* — notched cable barrier posts [8]; *b* — split rods of front barriers

нических характеристик материала ДО. Моделирование разрушения элементов дорожных ограждений, а также оценка их работы после достижения материалом предельных характеристик в момент локализации деформаций связаны с потребностью учета разрушения в физико-математических моделях материала ДО, что необходимо для объективной оценки работы конструкций ДО как при проектировании, так и при сертификационном анализе. Особенно важен учет разрушения для конструкций ДО, в которых с целью поглощения энергии при ударе используются элементы с прогнозируемым разрушением.

Вопросы моделирования неконтролируемого разрушения балок барьерных ограждений рассмотрены в работе [17]. Авторы изучили вариант разрушения балок от растягивающих нагрузок экспериментально и путем моделирования. В модели для описания разрушений в области отверстий была применена сетка с размером конечного элемента (КЭ) менее 1 мм и критерием разрушения по эф-

фективным пластическим деформациям. Такой подход привел к удовлетворительным результатам при сравнении с экспериментом, но не может быть использован на полной конструкции ограждения, так как при расчете явными методами для обеспечения стабильности модели уменьшение шага дискретизации по пространству ведет к уменьшению дискретизации по времени, что существенно увеличивает время расчета, и кроме того, как будет показано далее, не всегда приводит к корректным результатам.

Следует отметить, что разработка элементов с прогнозируемым разрушением посредством цифрового моделирования является перспективным направлением в области проектирования ДО. В труде [8] для стоек закрытого типа, которые применяются в конструкциях ТДО, разработана методика моделирования прогнозируемого разрушения с использованием когезионных элементов. Аналогичный подход применен в публикации [16] для моделирования процесса

прогнозируемого разрушения в элементах ФО — разрезных стержнях. В обоих случаях необходимые параметры для задания модели когезионных элементов определялись на основе только численных экспериментов, а исследования по моделированию неконтролируемого разрушения элементов ДО практически отсутствуют.

В настоящем исследовании рассмотрен иной подход к цифровому моделированию процессов прогнозируемого разрушения, а также приведен один из возможных вариантов цифрового моделирования неконтролируемого разрушения. Оба подхода основываются на применении расчетно-экспериментальных параметров, истинных диаграмм деформирования, моделей поврежденности, а также стендовых испытаниях, посредством которых проводилась валидация разработанных моделей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве объекта исследования методом цифрового моделирования выбраны ДО, в основных элементах которых может возникать разрушение, — стойки, разрезные стержни, балки. Для них проведены стендовые и полномасштабные натурные испытания на испытательных площадках Испытательного центра Научно-исследовательского центра по испытаниям и доводке автотехники ФГУП «Государственный научный центр Российской Федерации» (ИЦ НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ») и кафедры строительной механики МАДИ.

Цифровое моделирование проводилось в программном комплексе (ПК) LS-DYNA, позволяющем рассматривать задачи динамики переходных процессов, которыми являются задачи ударного наезда автомобиля на ДО, явными методами. Уравнения движения системы с конечным числом степеней свободы при интегрировании по явной схеме в LS-DYNA на шаге n имеют вид:

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\}^n + \{\mathbf{F}_{int}\}^n = \{\mathbf{F}_{ext}\}^n, \quad (1)$$

где $[\mathbf{M}]$ — матрица масс системы; $\{\ddot{\mathbf{u}}\}^n$ — вектор ускорений узлов системы; $\{\mathbf{F}_{int}\}^n$ и $\{\mathbf{F}_{ext}\}^n$ — вектор внешних и внутренних сил соответственно.

Значения перемещений, скоростей и ускорений узлов на следующем шаге $n + 1$ получены с помо-

щью метода центральных разностей, исходя из значения ускорений на шаге n :

$$\{\ddot{\mathbf{u}}\}^n = [\mathbf{M}]^{-1} \left(\{\mathbf{F}_{ext}\}^n - \{\mathbf{F}_{int}\}^n \right); \quad (2)$$

$$\{\dot{\mathbf{u}}\}^{n+1/2} = \{\dot{\mathbf{u}}\}^{n-1/2+\alpha} + \alpha \{\ddot{\mathbf{u}}\}^n \Delta t^n; \quad (3)$$

$$\{\mathbf{u}\}^{n+1} = \{\mathbf{u}\}^n + \{\dot{\mathbf{u}}\}^{n+1/2} \Delta t^n, \quad (4)$$

где $\alpha = 0,5$ при $t = 0$ и $\alpha = 1$ при $t > 0$. После определения значений перемещений системы $\{\mathbf{u}\}^{n+1}$ на $n + 1$ шаге по времени происходит обновление координат узлов системы:

$$\{\mathbf{x}\}^{n+1} = \{\mathbf{x}\}^0 + \{\mathbf{u}\}^{n+1}, \quad (5)$$

где $\{\mathbf{x}\}^{n+1}$ — координаты узлов новой конфигурации системы (после внешнего воздействия); $\{\mathbf{x}\}^0$ — координаты узлов исходной конфигурации системы (до внешнего воздействия).

Далее расчет идет итерационно до достижения расчетного времени процесса t . Свойства материала, а также связь между напряжениями и деформациями учитываются в физико-математических моделях материалов при определении составляющей $\{\mathbf{F}_{int}\}^n$.

Цифровое моделирование процесса ударного наезда автомобиля на ДО, которое также принято называть виртуальными испытаниями, условно можно разделить на этапы:

1. Построение конечно-элементных (КЭ) моделей отдельных конструктивных деталей ограждения и их объединение (сборка) в общую цифровую модель ДО.
2. Выбор физико-математических моделей материала для деталей ограждения и задание параметров этих моделей.
3. Создание КЭ модели автомобиля, который будет совершать наезд на ограждение, и параметров наезда (скорость, угол наезда).
4. Задание граничных условий, контактных взаимодействий между элементами ДО и наезжающего автомобиля, постановка на расчет (проведение полномасштабных виртуальных испытаний).
5. Анализ результатов расчета.

Из приведенных этапов основными следует считать этапы 1 и 2, так как именно на них формируются цифровые модели (ЦМ) элементов ДО, механика ко-



Рис. 4. Типовая схема построения валидированных цифровых моделей дорожных ограждений

Fig. 4. A typical scheme for creating validated digital models of road barriers

торых напрямую зависят от качества КЭ сетки и заданных параметров выбранной модели материала, а следовательно, результаты решения уравнения (1) на каждом временном шаге. Под ЦМ элемента ДО будем понимать КЭ модель с заданными параметрами выбранной физико-математической модели материала. Для построения валидированных цифровых моделей в настоящей работе предложена следующая последовательность (этапность) действий (схема), приведенная на рис. 4, построенная по системе «материал – деталь – изделие». Принимается, что ЦМ считается валидированной, если разница между амплитудными значениями определяемых величин (например, усилие, перемещение, деформация, ускорение и т.д.) в этой модели по сравнению с натурным экспериментом не превышает 10 %.

В настоящей работе в качестве модели материала для стальных элементов ДО была принята модель *MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY, входящая в базу моделей материалов ПК LS-DYNA (обозначение модели материала принято в соответствии с обозначением в ПК LS-DYNA).

В *MAT_024 деформации в материале разделяются на упругие и пластические. Кривая деформирования (истинная диаграмма деформирования) аппроксимируется кусочно-линейно, т.е. пластические деформации разбиваются на интервалы (участки) и на каждом участке пластический модуль считается постоянным.

Упругую область деформаций от пластической отделяет поверхность текучести, которая в *MAT_024 представлена критерием Мизеса:

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} \leq 0; \quad (6)$$



Рис. 5. Испытания на растяжение: а — типичный вид образцов; б — тензометрическое оборудование

Fig. 5. Tensile tests: a — typical form of specimens; b — strain gauge equipment

$$\sigma_y = \beta \left[\sigma_\tau + f_h(\epsilon_{eff}^p) \right], \quad (7)$$

где J_2 — второй инвариант девиатора напряжений s_{ij} ; ϵ_{eff}^p — эффективные пластические деформации; $f_h(\epsilon_{eff}^p)$ — функция упрочнения; β — параметр, влияющий на напряжения текучести σ_y в зависимости от скорости деформаций, может быть определен выражением:

$$\beta = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^p, \quad (8)$$

где $\dot{\epsilon} = \sqrt{\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ — скорость деформаций; C, p — параметры модели Купера – Саймондса.

Из приведенных уравнений видно, что связь между напряжениями и деформациями в *MAT_024 и поведение материала при пластических деформациях, в частности при определении $\{F_{int}\}^n$, в основном зависит от принятой истинной диаграммы деформирования.

Для построения истинной диаграммы и установления ключевых механических характеристик материалов основных элементов конструкций ДО — балок, стоек, разрезных стержней — проводились механические испытания на растяжение плоских образцов, вырезанных из рассматриваемых элементов ДО (рис. 5, а). При выполнении испытаний применялась тензометрическая аппаратура — тензорезисторы и экстензометр (рис. 5, б). В результате испытаний для каждого материала элементов строились условные (инженерные) диаграммы деформирования, которые впоследствии перестраивались в истинные диаграммы.

Один из рекомендуемых методов построения истинной диаграммы деформирования состоит в следующем [18]: полученная в результате испытаний на одноосное растяжение условная (инженерная) диаграмма деформирования делится на три части (рис. 6):

упругую, зону упрочнения, зону местной текучести или зону разупрочнения, в которой происходит локализация деформаций.

Первая часть условной диаграммы растяжения (от 0 до предела текучести σ_T совпадает с истинной диаграммой, так как на этом участке поперечные деформации очень малы, и разница между истинными и условными (инженерными) напряжениями, а также истинными и условными (инженерными) деформациями незначительна. Связь между напряжениями и деформациями на этом участке выражается законом Гука:

$$\sigma(\epsilon) = E \cdot \epsilon, \text{ при } \epsilon \leq \epsilon^{yp}, \quad (9)$$

где ϵ^{yp} — инженерные деформации при пределе текучести.

Вторая часть условной диаграммы (от предела текучести σ_T до предела прочности σ_B) отличается от истинной диаграммы, поскольку на этом участке величины деформаций (продольных и поперечных) существенно отличаются от упругих, и намечается место будущего разрыва. Экспериментально установлено, что пластическая деформация сталей протекает без изменения объема материала [18], поэтому для определения истинных напряжений σ_{ij} и истинных деформаций ϵ_{ij} в j -й точке в пределах второй части истинной диаграммы растяжения применяется условие постоянства объема материала (УПО или VCM):

$$\begin{aligned} \epsilon_{ij} &= \ln(1 + \epsilon_j); \\ \sigma_{ij} &= \sigma_j \cdot (1 + \epsilon_j), \end{aligned} \quad (10)$$

где ϵ_j — значение инженерной деформации в j -й точке на условной диаграмме (рис. 6); σ_j — инженерное напряжение в j -й точке на условной диаграмме (рис. 6).

Таким образом, для определения истинных напряжений и истинных деформаций в j -й точке на вто-

рой части будущей истинной диаграммы деформирования используются зависимости (10).

На третьей части условной диаграммы растяжения (зоне местной текучести) от предела прочности σ_B до напряжения при разрыве σ_P из-за образования местного сужения (шейки) происходит потеря устойчивости равномерного пластического деформирования и локализация деформации — деформация отмечается лишь в зоне шейки. В связи с этим величины истинных деформаций и истинных напряжений существенно больше, чем соответствующие им значения инженерных напряжений и деформаций. Измерение и вычисление этих величин напрямую в процессе эксперимента являются достаточно сложной задачей и, как правило, проводятся с применением метода корреляции цифровых изображений (Digital Image Correlation — DIC) [19–23]. Для реализации DIC необходимо располагать дорогостоящим оборудованием (высокоскоростные видеокамеры и программное обеспечение для обработки результатов) и определенными навыками в его настройке, что служит основным недостатком.

Однако установить взаимосвязь между интенсивностью напряжений и интенсивностью деформаций для построения третьего участка истинной диаграммы возможно, не прибегая к прямым измерениям в процессе эксперимента, выбрав подходящий вид функции (закон деформирования). Наиболее подходящие функции для описания участка локализации на истинных диаграммах деформирования — феноменологические модели упрочнения [23–26], из которых в настоящем исследовании выбрана модель (кривая упрочнения) Хоккетта и Шерби (Hockett – Sherby) [27]:

$$\sigma(\epsilon) = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_T) \cdot e^{(-N\epsilon^p)}, \quad (11)$$

где σ_T — предел текучести; σ_s — установившееся напряжение течения, которое также необходимо определить; N и p — параметры, подлежащие определению.

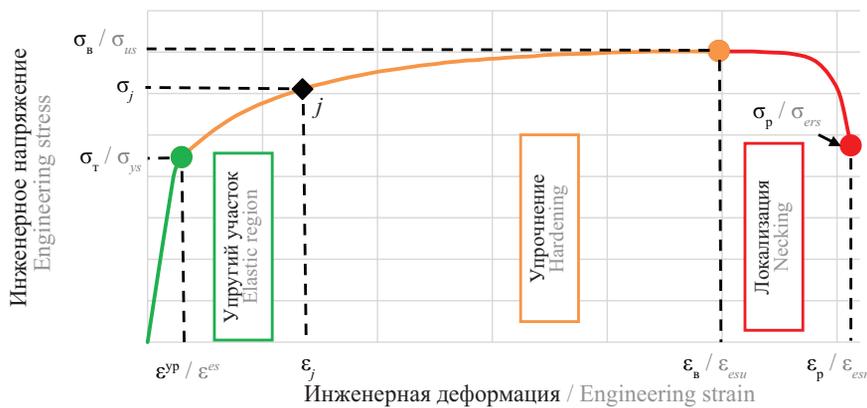


Рис. 6. Участки условной диаграммы деформирования: σ_T — предел текучести; σ_B — предел прочности; ϵ_B — инженерная деформация при пределе прочности; σ_P — инженерное напряжение при разрыве; ϵ_B — инженерная деформация при разрыве

Fig. 6. Regions of engineering stress-strain curve: σ_{ys} — yield strength; ϵ^{es} — engineering strain at yield strength; σ_{us} — ultimate strength; ϵ_{esu} — engineering strain at ultimate strength; σ_{ers} — engineering rupture stress; ϵ_{ers} — engineering strain at rupture

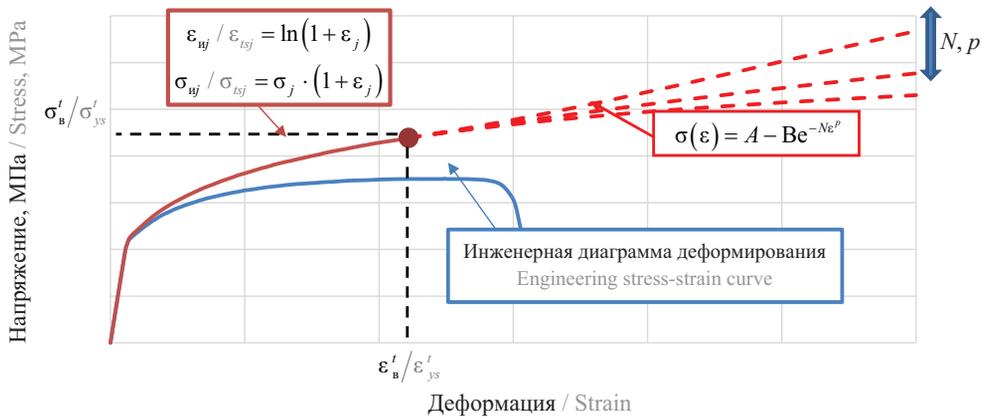


Рис. 7. Экстраполяция истинной диаграммы деформирования по модели Хоккетта и Шерби

Fig. 7. True stress-strain curve extrapolation by Hockett – Sherby model

Следует отметить, что количество определяемых параметров в уравнении (11) можно свести к двум — N и p , используя модель Хоккетта и Шерби в модифицированном виде и следующие условия:

$$\sigma(\epsilon) = A - B e^{-N\epsilon^p}; \quad (12)$$

$$\begin{cases} \sigma(\epsilon_b^t) = \sigma_b^t; \\ \left. \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right|_{\epsilon = \epsilon_b^t} = \sigma_b^t, \end{cases} \quad (13)$$

где σ_b^t, ϵ_b^t — напряжения и деформации на истинной диаграмме деформирования, соответствующие пределу прочности и деформациям при пределе прочности на условной диаграмме соответственно.

Вид истинной диаграммы деформирования, построенной по вышеизложенному подходу, показан на рис. 7.

В настоящей работе параметры A и B в модели (12) определялись по условию (13), которое математически выражает гладкость и непрерывность функции при переходе с участка равномерного пластического деформирования на участок локализации в точке с координатами $(\epsilon_b^t, \sigma_b^t)$.

С целью идентификации и калибровки параметров N и p был применен обратный метод, который заключался в итерационном подборе таких значений искомых параметров модели, при которых различие между экспериментальной и полученной в ре-

зультате численного эксперимента (виртуальных испытаний) кривыми было бы минимально. Для проведения виртуальных испытаний, имитирующих процесс растяжения плоских образцов для каждого материала, построены оболочечные КЭ модели, одна из которых приведена на рис. 8. Геометрические параметры КЭ моделей образцов и условия испытаний соответствовали натурным.

Процедура минимизации ошибки $F(x)$ при определении указанных параметров N и p в модели (12) была итерационной, проводилась в ПК LS-OPT и математически выражалась как разница между результатами численного y^m и натурального y^e экспериментов [27]:

$$\min F(x) = \min \|y^e - y^m\|. \quad (14)$$

Для измерения расстояния (ошибки) между значениями на экспериментальной P и численной Q кривыми существуют различные алгоритмы [28], среди которых для решения рассматриваемой задачи был выбран алгоритм динамической трансформации временной шкалы (Dynamic Time Warping — DTW). DTW вычисляет расстояние между точками рассматриваемых кривых с помощью пути трансформации $W = w_1, w_2, \dots, w_r$. Этот путь является результатом минимального накопленного расстояния, необходимого для прохождения всех точек рассматриваемых кривых. Математически алгоритм выражается следующим образом [28]:

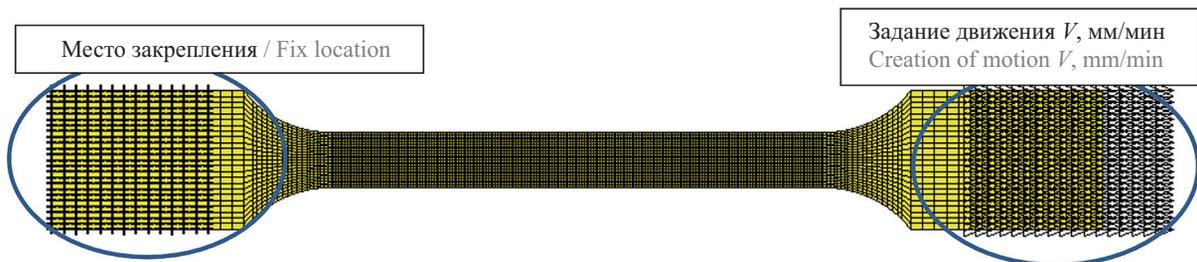


Рис. 8. Виртуальное испытание на растяжение плоского образца

Fig. 8. Virtual tensile test of flat specimen

$$DTW(P, Q) = \frac{1}{l} \min_w \left\{ \sum_{i=1}^l \delta(w_i) \right\}, \quad (15)$$

где $\delta(w_i)$ — расстояние между «подобными» точками кривых.

Одним из наиболее подходящих критериев разрушения и определения места разрушения при наличии только истинных диаграмм деформирования, как уже ранее было указано, служит критерий эффективных пластических деформаций:

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p \right)^{0,5} dt > \varepsilon_k = \ln \left(\frac{1}{1-\psi} \right), \quad (16)$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ — тензор скоростей деформации; ψ — относительное сужение, определяемое из механических испытаний на растяжение.

Для оценки поведения материала при сложных комбинациях напряженно-деформированного состояния, в частности разрушения, и для тех случаев, где критерий (16) сомнителен, необходимо применение иных моделей с сопутствующим определением требуемых дополнительных параметров. В целях реализации вышеизложенного в данной работе применяемая модель материала дополнялась моделью поврежденности. В качестве модели поврежденности использовалась обобщенная инкрементальная модель поврежденности, зависящая от напряженного состояния (Generalized Incremental Stress State dependent damage model — GISSMO). Модель GISSMO разработана Daimler AG и DYNAmore GmbH [29] для прогнозирования разрушения на основе постепенного накопления поврежденности, включая разупрочнение при различных напряженных состояниях, характеризующихся параметром трехосности. Рассматриваемая модель, сформулированная на основе модели разрушения Джонсона – Кука [30], является феноменологической и предполагает, что процесс разрушения начинается тогда, когда поврежденность достигает критического значения.

Первой важной особенностью GISSMO служит то, что накопление поврежденности имеет направленность (путь нагружения) и зависит от параметра трехосности:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{vm}}, \quad (17)$$

где σ_m , σ_{vm} — среднее и эквивалентное напряжения (по Мизесу) соответственно.

Накопление поврежденности в GISSMO осуществляется по следующему закону:

$$\Delta D = \frac{n}{\varepsilon_f(\eta)} D^{\left(\frac{1-1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_{pl}, \quad (18)$$

где n — показатель, позволяющий учитывать нелинейное накопление поврежденности; $\varepsilon_f(\eta)$ — весовая функция, представляющая собой деформации разрушения в зависимости от параметра трехосности;

$\Delta \varepsilon_{pl}$ — приращение текущей эквивалентной пластической деформации.

Значение параметра поврежденности в КЭ в начале $D = 0$ (при численных процедурах в начале расчета принимается $D = 10^{-20}$) и увеличивается по мере накопления поврежденности по выражению (18) до значения 1. Когда значение параметра составляет $D = 1$, происходит разрушение путем удаления КЭ.

Второй важной особенностью модели GISSMO является связь между напряжениями и поврежденностью в КЭ, которая учитывается параметром неустойчивости F , накопление которого осуществляется по аналогичному закону:

$$\Delta F = \frac{n}{\varepsilon_{crit}(\eta)} F^{\left(\frac{1-1}{n}\right)} \Delta \varepsilon_{pl}, \quad (19)$$

где $\varepsilon_{crit}(\eta)$ — весовая функция, представляющая собой деформации, при которых происходит их локализация, также зависящие от параметра трехосности и при которых накопленная поврежденность начинает оказывать влияние на напряжения.

При достижении $F = 1$ с учетом законов накопления поврежденности (18) и неустойчивости (19) в зависимости от параметра трехосности связь между тензорами напряжений с учетом σ^* и без учета поврежденности σ определяется следующим образом:

$$\sigma^* = \sigma \left[1 - \left(\frac{D - D_{crit}}{1 - D_{crit}} \right)^m \right], \text{ при } D \geq D_{crit}, \quad (20)$$

где D_{crit} — величина накопленной поврежденности при достижении $F = 1$; m — показатель затухания, характеризующий скорость падения напряжения.

Для калибровки параметров GISSMO — n , m , $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$ — в настоящем исследовании применен обратный метод, который, как и ранее, заключался в минимизации ошибки между результатами численного и натурального экспериментов (минимизация разницы значений в точках на расчетных и экспериментальных кривых) в программе LS-OPT. Натурные и виртуальные испытания проводились на стандартных (№ 6) и со специальной геометрией (№ 1–5) образцах (рис. 9). Благодаря такой форме образцов реализуются различные параметры трехосности при испытаниях на растяжение. Однако указанные на рис. 9 параметры трехосности являются теоретическими. В действительности параметр трехосности может меняться из-за деформации сечения образца в течение всего процесса нагружения. Поэтому при определении $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$, помимо теоретических значений трехосности, учитывался более широкий диапазон.

Для численных экспериментов минимальный размер КЭ составлял 0,5 мм. С целью добавления модели поврежденности GISSMO при проведении виртуальных испытаний в LS-DYNA использовалась карта *MAT_ADD_DAMAGE_GISSMO.

Достаточно большая размерность общих ЦМ деформируемых ДО, в которых, как правило, размер КЭ для основных деталей достигает 5–20 мм, дела-

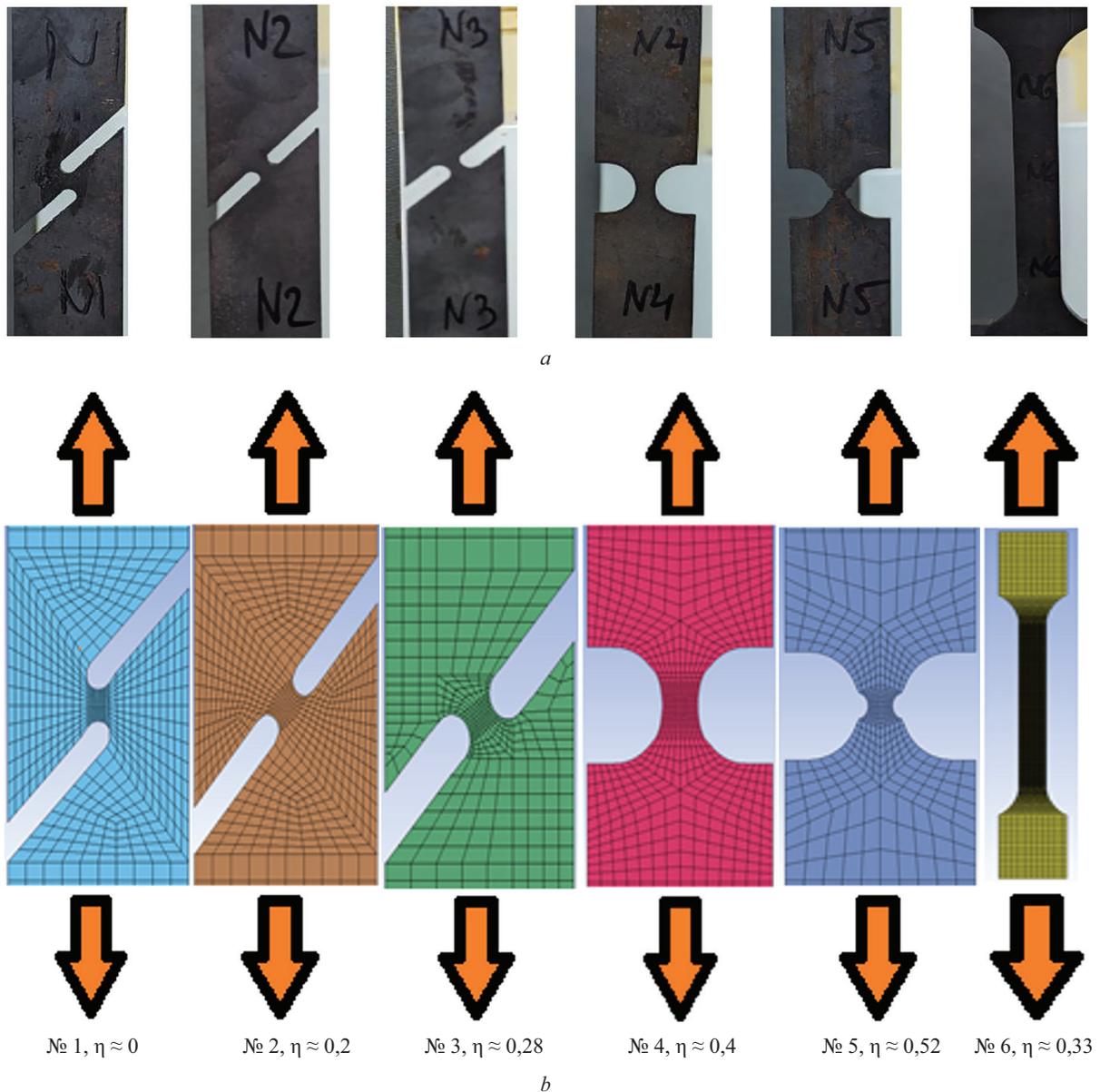


Рис. 9. Образцы для определения параметров GISSMO при разных теоретических значениях параметров трехосности: *a* — натурные; *b* — КЭ модели

Fig. 9. Specimens for determining GISSMO parameters at various theoretical values of triaxiality: *a* — full-scale; *b* — FE models

ет практически невозможным применение КЭ размером 0,5 по причинам, указанным ранее. В модели GISSMO предусмотрена функция для распространения откалиброванных параметров на другие размеры элементов, которая подразумевает построение и калибровку двух дополнительных кривых, одна из которых путем введения регуляризирующего (корректирующего) множителя масштабирует параметр $\epsilon_f(\eta)$ в зависимости от размера КЭ, другая изменяет параметр m в зависимости от размера КЭ.

Для реализации вышеуказанного проведена серия численных экспериментов на растяжение в LS-DYNA стандартных образцов (№ 6, $\eta = 0,33$) с разными минимальными размерами КЭ — 1; 2,5; 5 и 10 мм. До-

полнительные кривые были получены обратным методом с использованием LS-OPT.

Вторым основным этапом после определения необходимых параметров для выбранных физико-математических моделей материалов исследуемых деталей является их применение для разработки валидированных моделей отдельных конструктивных элементов. Разработку таких моделей целесообразно осуществлять, моделируя процесс работы отдельных элементов ДО, близкий к реальному в составе всего ограждения. В ходе таких испытаний исследуется влияние размера КЭ и принятых параметров моделей материалов на точность описания механики работы конструктивных элементов ДО, включая разрушение. С этой целью выполнены стендовые натурные

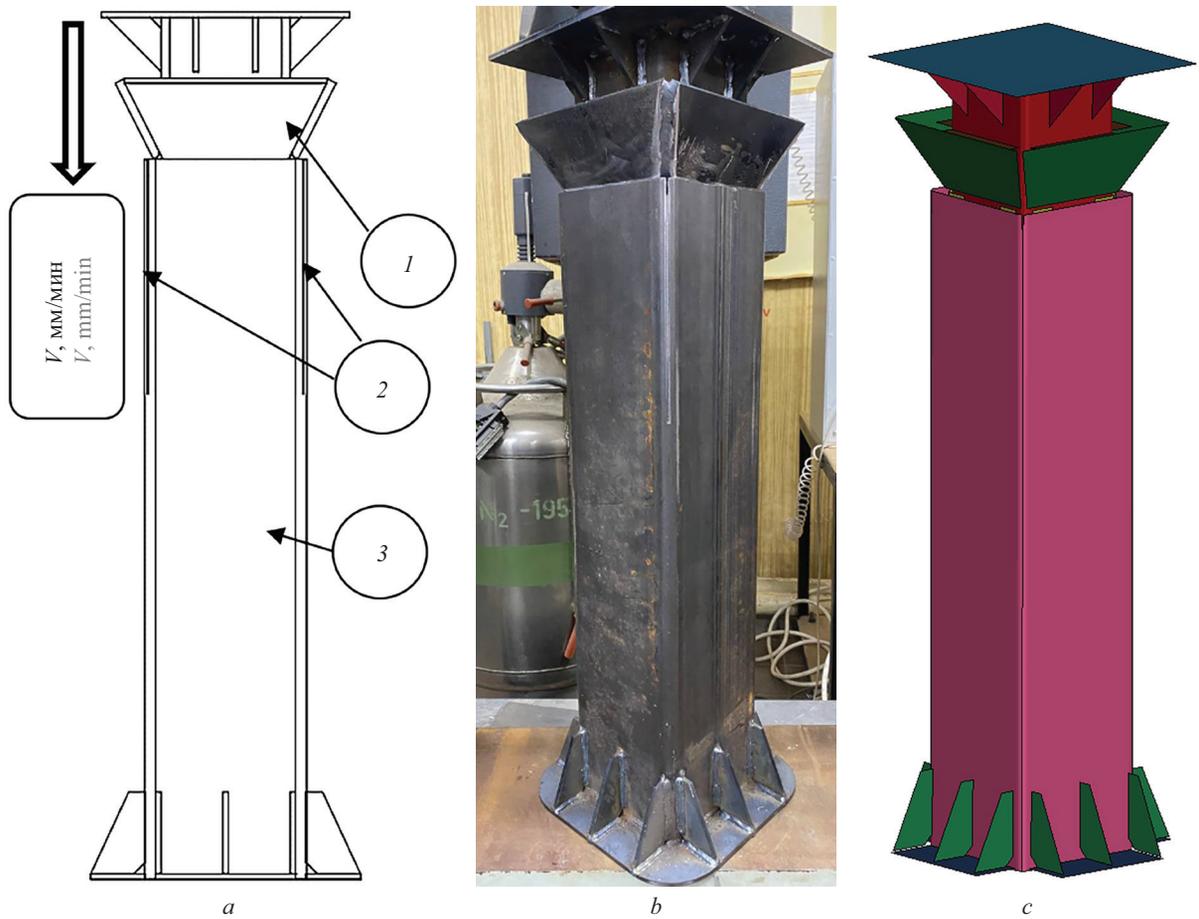


Рис. 10. Стендовые испытания разрезного стержня ФО: *a* — схема испытаний; *b* — натурные испытания; *c* — виртуальные испытания; 1 — режущий элемент; 2 — концентраторы напряжений; 3 — стержень

Fig. 10. Bench tests of split rod of front barrier: *a* — test scheme; *b* — full-scale tests; *c* — virtual tests; 1 — cutting element; 2 — stress concentrators; 3 — rod

и виртуальные испытания основных типовых элементов деформируемых ДО — разрезных стержней и балок, в которых, как правило, происходит разрушение — прогнозируемое и неконтролируемое.

Исследование процесса прогнозируемого разрушения в настоящей работе проведено на примере типового энергопоглощающего элемента — разрезного стержня, применяющегося в конструкциях ФО

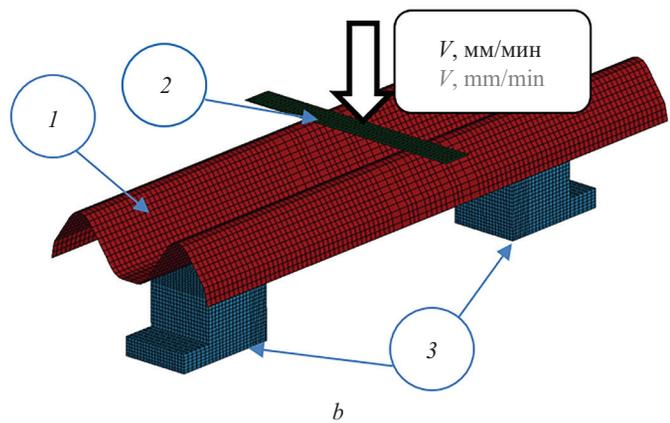
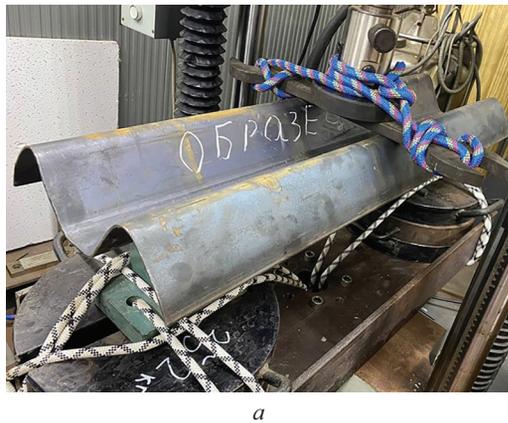


Рис. 11. Стендовые испытания балки БДО: *a* — схема испытаний; *b* — натурные испытания; 1 — балка; 2 — нагружающий элемент; 3 — опоры

Fig. 11. Bench tests of guardrail barrier beam: *a* — test scheme; *b* — full-scale tests; 1 — beam; 2 — loading element; 3 — supports

с системой энергопоглощения по принципу прогнозируемого разрушения. При выполнении стендовых испытаний (рис. 10) стержень 3 с введенным концентратором 2 нагружался путем перемещения активной траверсы испытательной машины с постоянной скоростью, на которой установлен режущий элемент 1. Форма концентратора в изучаемой детали обуславливает направленный рост трещины по I моде. Для проведения виртуальных стендовых испытаний, моделирующих натурные, была разработана модель разрезного стержня с размером КЭ 2 мм. В качестве критериев разрушения рассматривались два критерия — по эффективному пластическим деформациям и по модели поврежденности GISSMO. Режущий элемент в модели принимался абсолютно жестким с использованием модели материала *MAT_020 RIGID.

Для исследования механики поведения балки — основного элемента БДО, за счет которого осуществляются удержание и поглощение энергии, проводились стендовые испытания, имитирующие ее основной вид деформации при ударном наезде ТС — изгиб (рис. 11). В процессе стендовых испытаний нагружение балки 1 выполнялось посредством вертикального перемещения активной траверсы испытательной машины, на которой установлен нагружающий элемент 2. Опоры 3 и нагружающий элемент в ЦМ виртуальных испытаний принимались абсолютно жесткими (модель материала *MAT_020).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве примера для материала разрезного стержня на рис. 12–19 приведены результаты калибровки и идентификации параметров модели материала *MAT_024 в виде истинной диаграммы деформирования, а также параметров модели GISSMO. Для материала балки параметры были получены аналогично.

Сравнение результатов натурных и виртуальных стендовых испытаний с применением полученных параметров моделей материала для исследуемых элементов конструкции ДО — разрезного стержня и балки — приведено на рис. 20–23 и в табл. 1, 2. Точность разработанных моделей разрезного стержня при различных критериях разрушения оценивалась по параметрам — первым пиковым усилием, характеризующем начало раскрытия трещины в месте введенного концентратора, средним усилиям на первом и втором участках постоянного сопротивления, а также по работе внешних сил (рис. 20). Точность разработанной модели балки оценивалась по среднему усилию на первом участке, характеризующем образование и последующую работу пластических шарниров в сечениях профиля балки, по максимальному усилию при изгибе балки, а также по работе внешних сил (рис. 22).

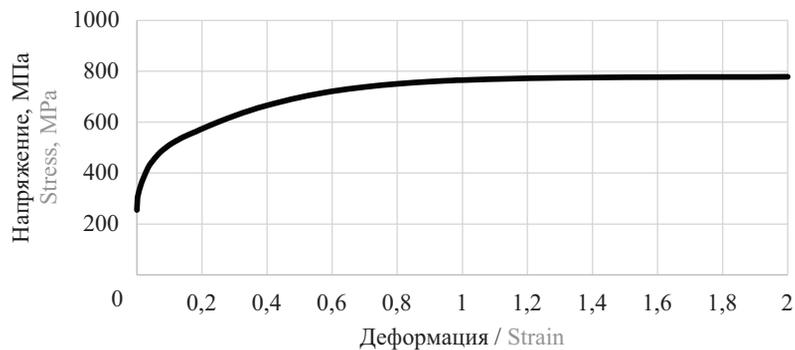


Рис. 12. Истинная диаграмма деформирования материала разрезного стержня

Fig. 12. True stress-strain curve of split rod material

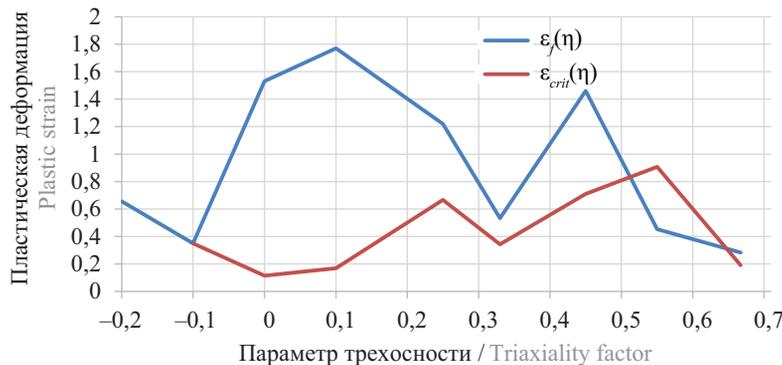
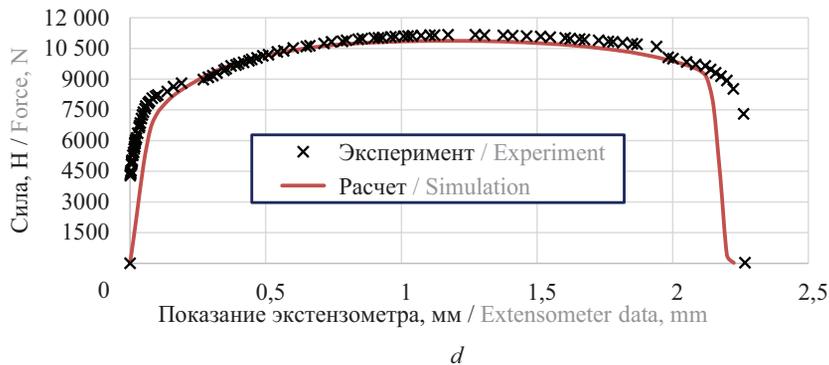
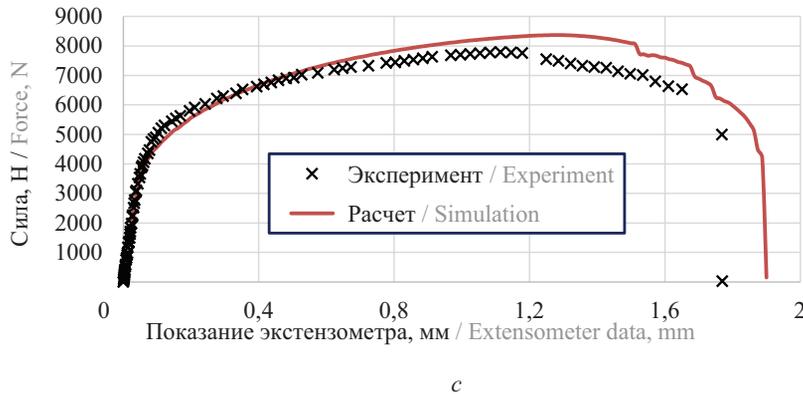
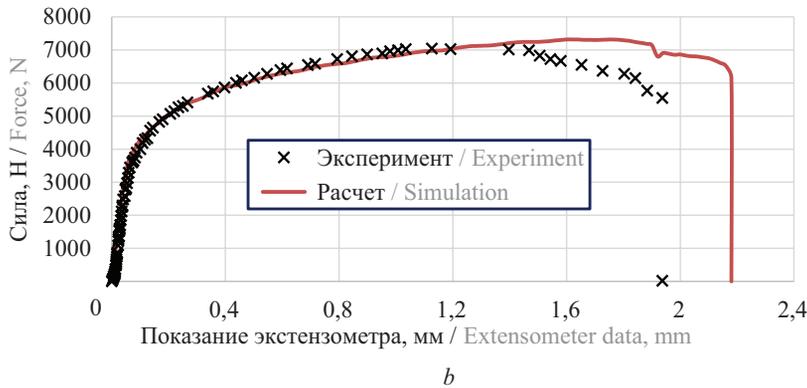
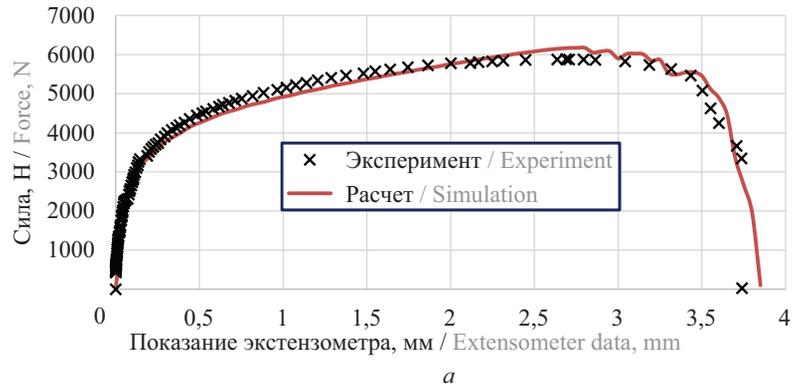


Рис. 13. Функции $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$, полученные в LS-OPT

Fig. 13. Functions $\varepsilon_f(\eta)$ и $\varepsilon_{crit}(\eta)$, achieved from LS-OPT

Анализ полученных результатов показывает, что различие между натурными и виртуальными стендовыми испытаниями по оцениваемым параметрам в случае применения модели поврежденности GISSMO и принятых истинных диаграмм деформирования не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой точности разработанных моделей и корректности подобранных параметров для мо-

делей материалов. В то же время применение критерия разрушения по эффективным пластическим деформациям обеспечивает меньшую точность моделирования процесса прогнозируемого разрушения (табл. 1). На основании принятых критериев валидации разработанные ЦМ отдельных элементов с принятыми диаграммами деформирования и моделью поврежденности GISSMO считаются валидирован-



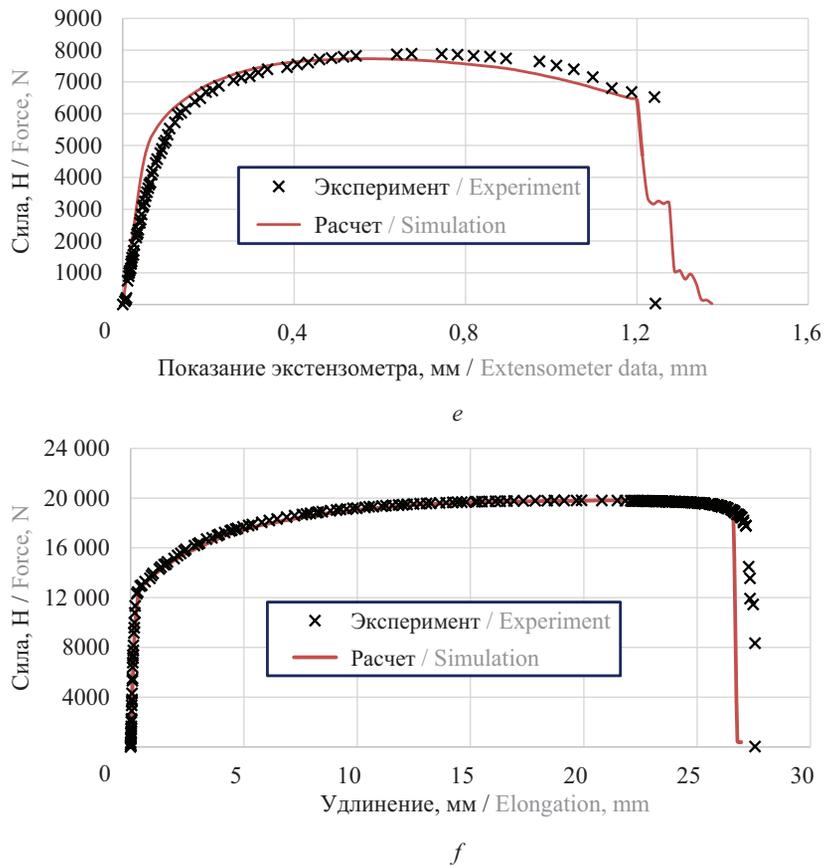


Рис. 14. Сравнение результатов натурального и численных экспериментов на образцах с различной геометрией: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3; *d* — образец № 4; *e* — образец № 5; *f* — образец № 6

Fig. 14. Comparison of the full-scale and virtual tests results on specimens with various geometry: *a* — specimen No. 1; *b* — specimen No. 2; *c* — specimen No. 3; *d* — specimen No. 4; *e* — specimen No. 5; *f* — specimen No. 6

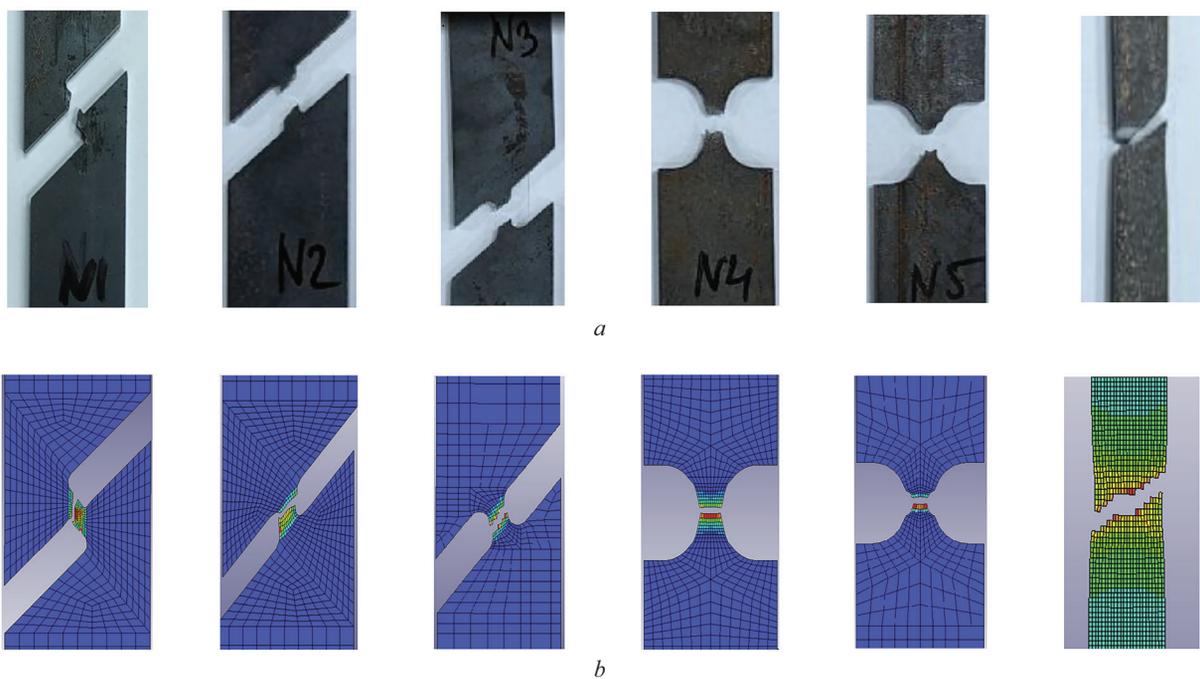


Рис. 15. Картина разрушения образцов различной геометрии: *a* — натуральных; *b* — КЭ моделей

Fig. 15. Fracture pattern of specimens of various geometry: *a* — full-scale; *b* — FE models

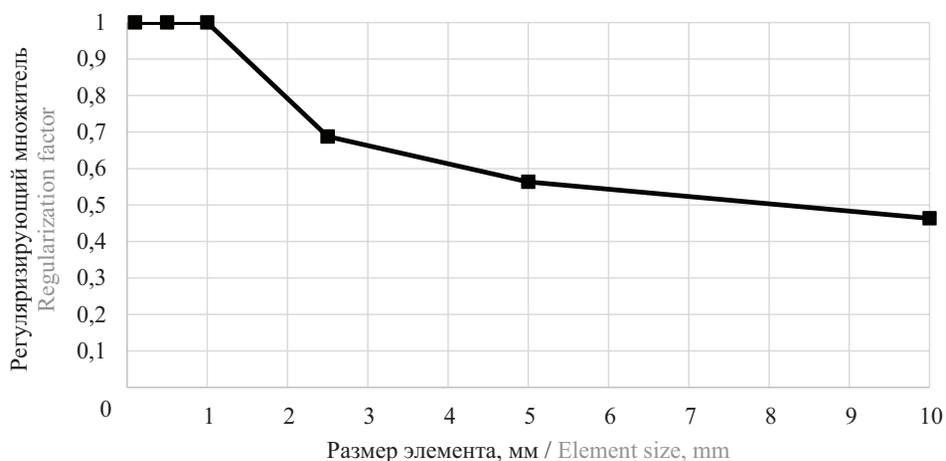


Рис. 16. Регуляризирующий множитель для $\epsilon(\eta)$ в зависимости от размера КЭ

Fig. 16. Regularization factor depending $\epsilon(\eta)$ on the size of FE

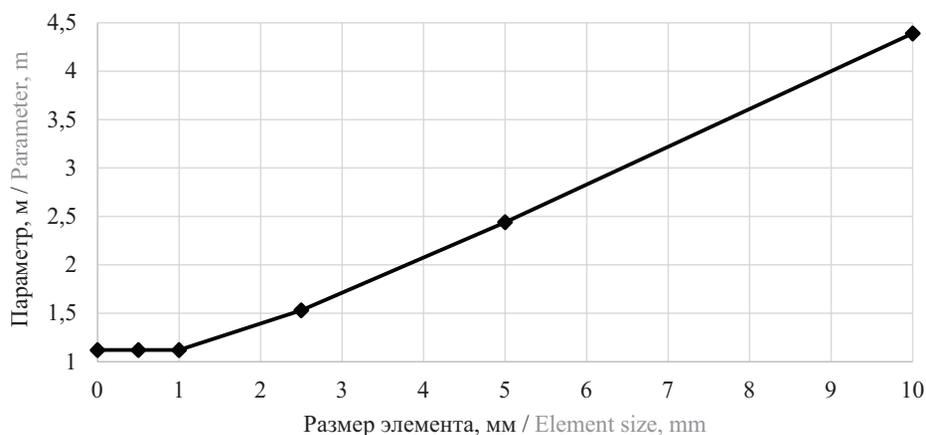


Рис. 17. Параметр затухания m в зависимости от размера КЭ

Fig. 17. Fading exponent m depending on the element size of FE

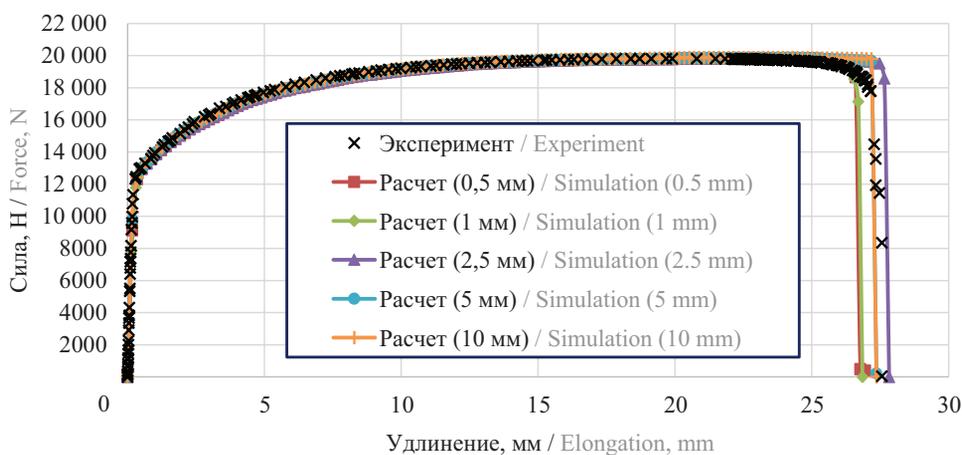


Рис. 18. Результаты численных экспериментов на растяжение при различных размерах КЭ

Fig. 18. Results of virtual tensile tests for various FE sizes

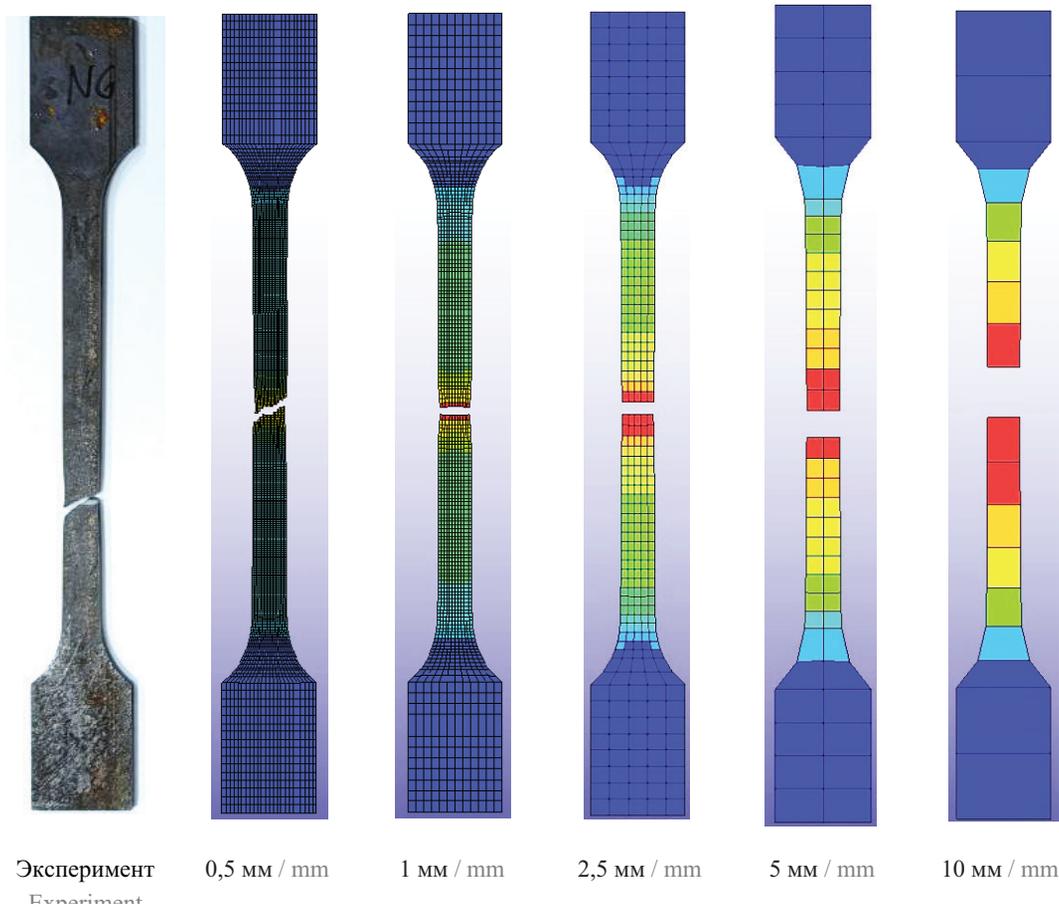


Рис. 19. Картина разрушения натурного и КЭ моделей образцов с различной плотностью сетки после регуляризации
 Fig. 19. Fracture pattern of full-scale and FE models of specimens with different mesh densities after regularization

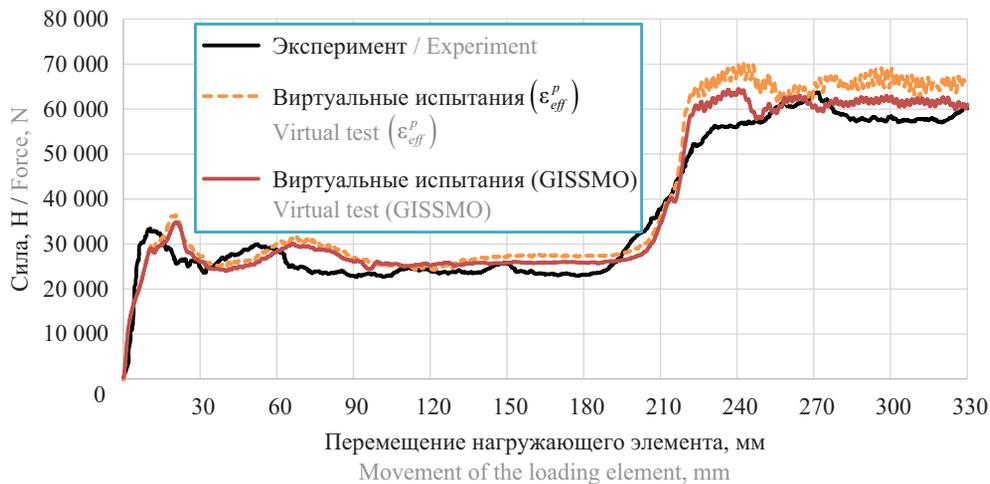


Рис. 20. Сравнение результатов натурных и виртуальных стендовых испытаний
 Fig. 20. Comparison of full-scale and virtual bench tests results

ными и в дальнейшем объединяются в общие цифровые модели ДО для проведения полномасштабных виртуальных испытаний.

В качестве примера на рис. 24–27 и в табл. 3 приведено сравнение результатов полномасштабных натурных и виртуальных испытаний двух типов ограждений — ФО с прогнозируемым разрушением

разрезных стержней и БДО с неконтролируемым разрушением балки, которое произошло при проведении полномасштабных натурных испытаний (рис. 2). В качестве критерия разрушения балки в разработанной цифровой модели БДО рассмотрены как критерий эффективных пластических деформаций, так и модель поврежденности GISSMO. В цифровой модели

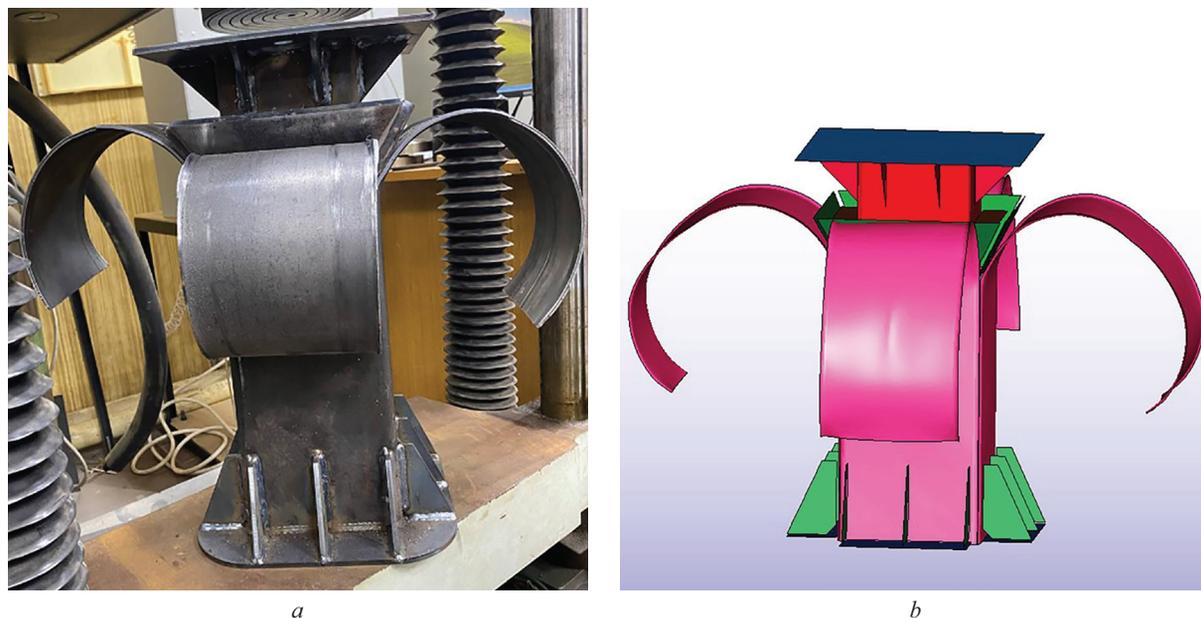


Рис. 21. Вид разрезного стержня после стендовых испытаний: *a* — натуральных; *b* — виртуальных
 Fig. 21. View of the split rod after bench tests: *a* — full-scale; *b* — virtual

Табл. 1. Сравнение результатов стендовых натуральных и виртуальных испытаний разрезного стержня
 Table 1. Comparison of the results of full-scale and virtual bench tests of a split rod

Параметр / Parameter	Эксперимент Experiment	Виртуальное ϵ_{eff}^p Virtual ϵ_{eff}^p	Виртуальное (GISSMO) Virtual (GISSMO)	Различие, % Difference, %
Первое пиковое усилие, кН First peak force, kN	33,42	36,33	34,79	8,7/4,1
Среднее усилие на первом участке, кН Average force in the first region, kN	24,73	27,09	26,19	9,5/5,9
Среднее усилие на втором участке, кН Average force in the second region, kN	58,71	65,67	61,83	11,9/5,3
Работа внешних сил, кДж External work, kJ	12,15	13,39	12,69	10,2/4,4

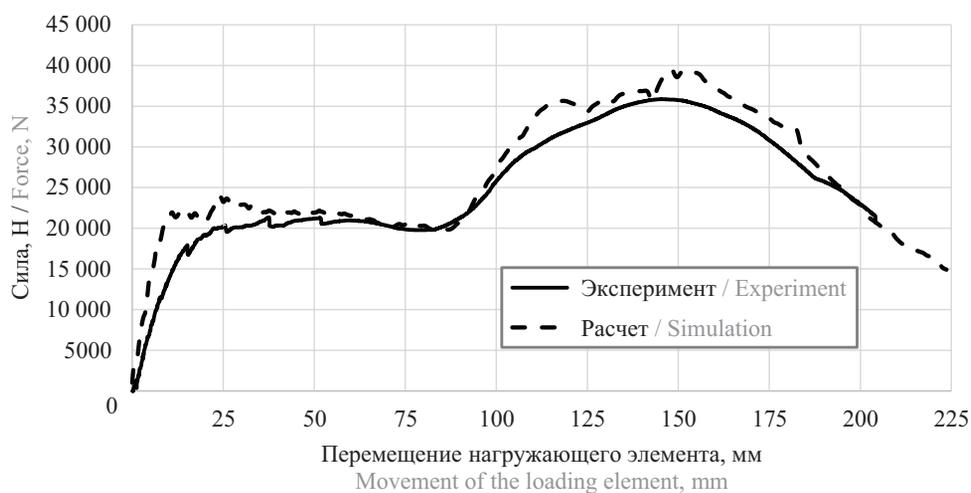


Рис. 22. Сравнение результатов натуральных и виртуальных стендовых испытаний балки
 Fig. 22. Comparison of the full-scale and virtual bench test results of the beam

Табл. 2. Сравнение результатов натуральных и виртуальных стендовых испытаний балки

Table 2. Comparison of the full-scale and virtual bench test results of the beam

Параметр / Parameter	Эксперимент Experiment	Расчет Simulation	Различие, % Difference, %
Среднее усилие, кН Average force, kN	20,55	21,45	4,38
Максимальное усилие, кН Maximum of the force, kN	35,85	39,41	9,93
Работа внешних сил, кДж External work, kJ	5,13	5,48	6,82



a



b

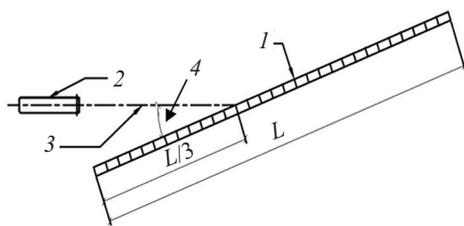
Рис. 23. Балка после стендовых испытаний: *a* — натуральных; *b* — виртуальных

Fig. 23. Beam after bench tests: *a* — full-scale; *b* — virtual

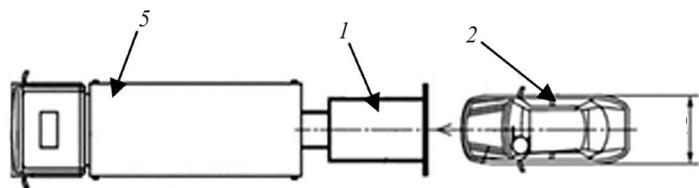
ФО применялись валидированные модели разрезных стержней с моделью поврежденности GISSMO. Начальные условия наезда автомобилей на рассматриваемые ДО при выполнении полномасштабных испытаний принимались в соответствии с данными протоколов натуральных испытаний, проведенных в ИЦ НИЦИАМТ ФГУП «НАМИ» по ГОСТ 33129 для БДО (рис. 24, *a*) и по ГОСТ Р 59291 (рис. 24, *b*).

Анализ проведенных полномасштабных испытаний ДО показал:

- при цифровом моделировании конструкции ФО с поглощением энергии по принципу прогнозируемого разрушения с применением валидированных моделей разрезных стержней различие между натурными и виртуальными испытаниями по оцененным параметрам (табл. 3) не превышает 10 %,



a



b

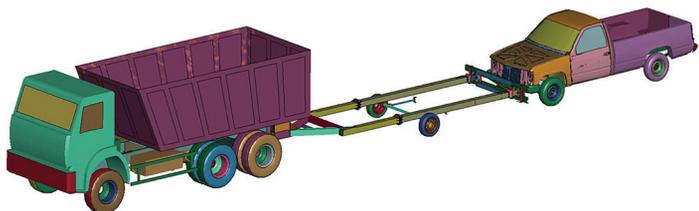
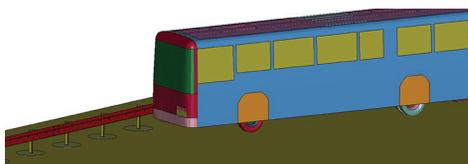


Рис. 24. Схема полномасштабных испытаний: *a* — БДО; *b* — ФО; 1 — ограждение; 2 — испытательный автомобиль; 3 — направление наезда; 4 — угол наезда $\alpha = 20^\circ$; 5 — автомобиль прикрытия

Fig. 24. Full-scale crash test scheme: *a* — guardrail barrier; *b* — front barrier; 1 — barrier; 2 — test vehicle; 3 — impact direction; 4 — impact angle; 5 — cover vehicle

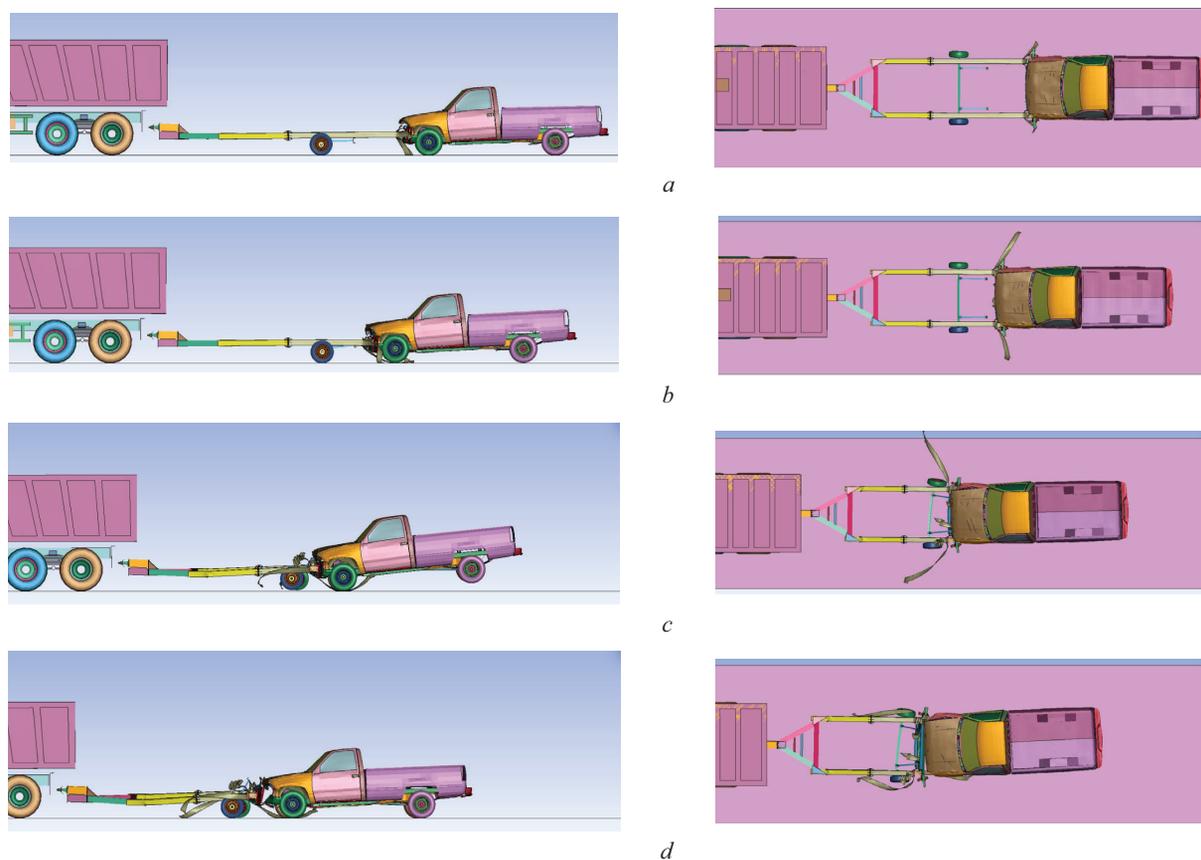


Рис. 25. Виртуальное испытание ФО: *a* — 0,05 с; *b* — 0,1 с; *c* — 0,3 с; *d* — 0,7 с

Fig. 25. Virtual test of front barrier: *a* — 0.05 s; *b* — 0.1 s; *c* — 0.3 s; *d* — 0.7 s

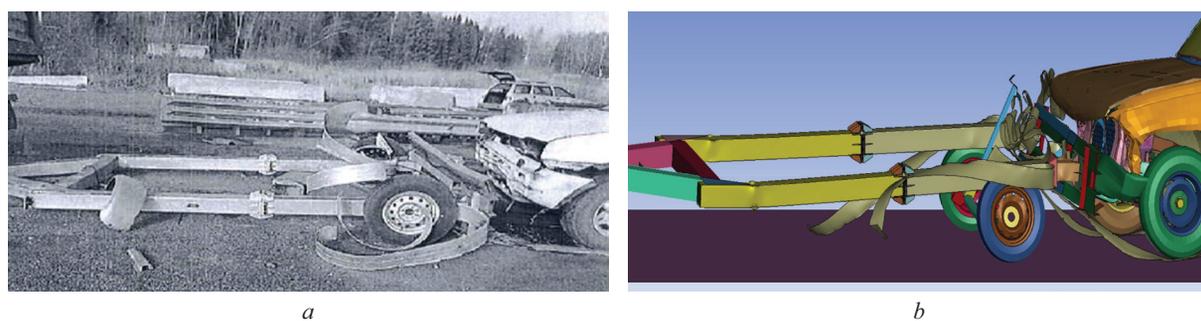


Рис. 26. ФО после удара: *a* — натурные испытания; *b* — виртуальные испытания

Fig. 26. Front barrier after impact: *a* — full-scale crash-test; *b* — virtual crash-test

Табл. 3. Сравнение результатов натурных и виртуальных испытаний ФО

Table 3. Comparison of the full-scale and virtual crash-test results of front barrier

Параметр / Parameter	Натурные испытания Full-scale test	Виртуальные испытания Virtual crash-test	Различие, % Difference, %
Деформация ограждения Deformation of barrier	3,765 м / м	3,48 м / м	7,57
Длина перемещения АП CV displacement	6,2 м / м	5,61 м / м	9,52
ИТТ / ASI	0,96	0,99	3,13

Примечание: АП — автомобиль прикрытия; ИТТ — индекс тяжести травмирования.

Note: CV — cover vehicle; ASI — acceleration severity index.

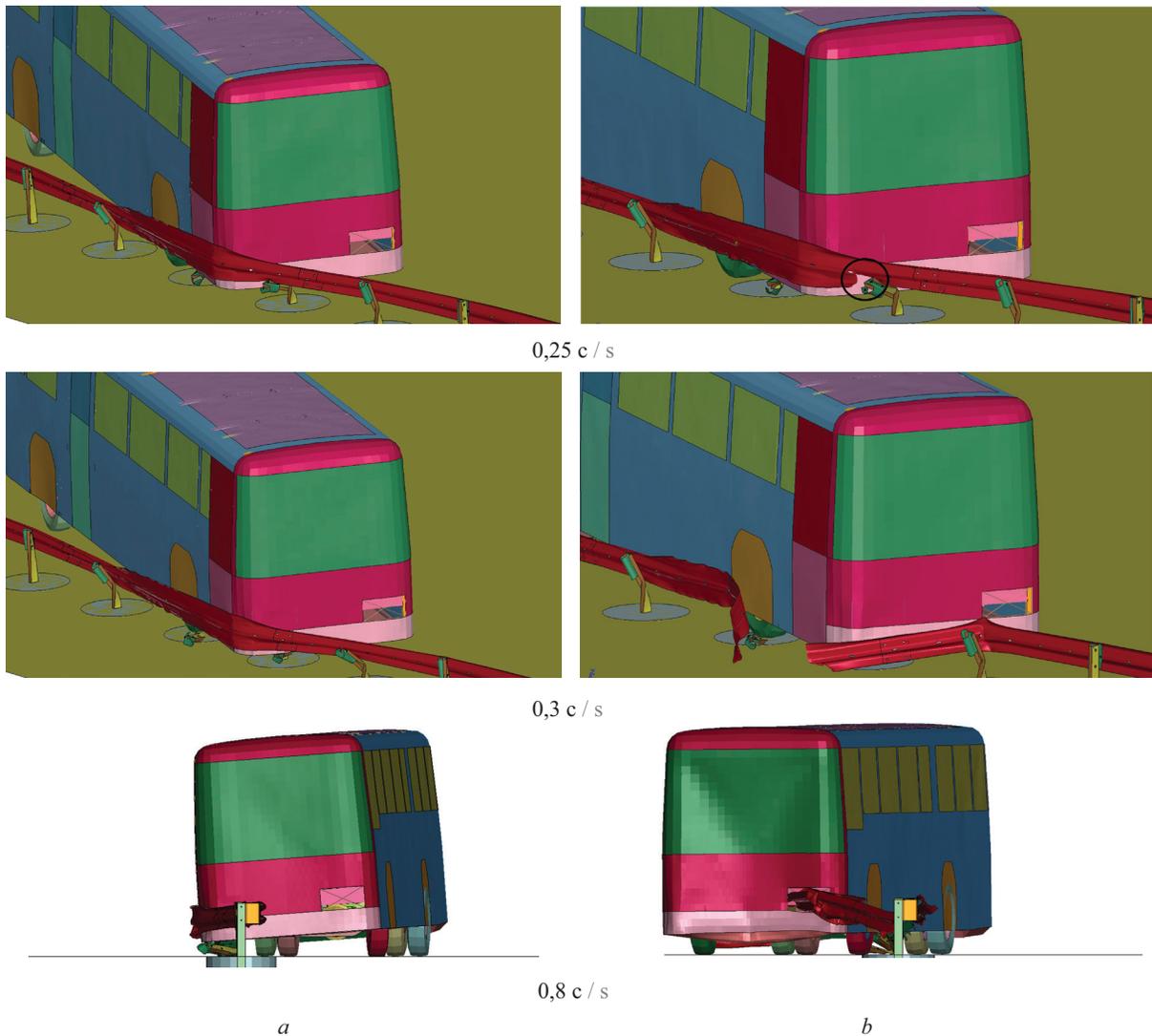


Рис. 27. Виртуальное испытание БДО при различных критериях разрушения: *a* — критерий эффективных пластических деформаций; *b* — GISSMO

Fig. 27. Virtual crash-test of guardrail barrier with various failure criteria: *a* — effective plastic strain; *b* — GISSMO

что свидетельствует о высокой точности и адекватности разработанных моделей;

- при цифровом моделировании конструкции БДО в случае применения в качестве критерия разрушения модели поврежденности GISSMO происходит разрушение секции балки, что согласуется с результатами натурных испытаний, в то время как при использовании критерия разрушения по эффективным пластическим деформациям разрыва балки не происходит.

Указанное выше свидетельствует о высокой точности и адекватности разработанных моделей по предложенному подходу проведения виртуальных испытаний по схеме поэтапной валидации: материал – деталь – изделие, с валидацией отдельных конструктивных элементов посредством стендовых испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основании анализа результатов цифрового моделирования разрушения элементов дорожных ограждений безопасности на примере стендовых

и полномасштабных испытаний различных конструкций ДО (БДО и ФО) было выявлено, что наибольшую точность в описании процессов разрушения элементов конструкций ДО по сравнению с ранее применяемыми дает использование в физико-математической модели материала модели поврежденности GISSMO. Следует отметить, что при идентификации и калибровке параметров моделей материалов, в частности построении истинных диаграмм деформирования, особенно в зоне локализации деформаций, а также параметров модели поврежденности GISSMO, целесообразно использовать обратный метод, а проверку корректности определенных параметров для моделей материалов и моделей поврежденности выполнять посредством сравнения натурных стендовых и виртуальных испытаний исследуемой детали, т.е. проведением процедуры валидации отдельной детали. В дальнейшем валидированные модели отдельных основных элементов объединяются в общие модели ограждений

для осуществления полномасштабных виртуальных испытаний и последующего анализа.

Результаты проведенных исследований следует учитывать при проектировании новых безопасных

и конкурентоспособных конструкций ДО, особенно конструкций, работающих по принципу прогнозируемого разрушения, а также при анализе разрушения конструкций при испытаниях и в эксплуатации.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Сторожев С.А., Логинов В.Ю., Аристархова А.Н.* Влияние сертификации дорожных ограждений на безопасность дорожного движения // Безопасность дорожного движения. 2022. № 2. С. 52–56. EDN OWTNRQ.
2. *Андреев К.П., Борычев С.Н., Терентьев В.В., Шемякин А.В.* Дорожные ограждения: современные решения для повышения безопасности движения // Грузовик. 2021. № 6. С. 43–48. EDN JXOXJJ.
3. *Андреев К.П., Терентьев В.В., Шемякин А.В.* Применение дорожного энергопоглощающего ограждения для повышения безопасности движения // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 1. С. 5–12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVGQRA.
4. *Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X.* Barriers involved in the safety management systems: a systematic review of literature // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2022. Vol. 19. Issue 15. P. 9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512
5. *Сунгатуллина К.А.* Условия и факторы, влияющие на безопасность дорожного движения на современном этапе // Вестник НЦБЖД. 2022. № 2 (52). С. 126–135. EDN UKXUKI.
6. *Дергунов С.А., Орехов С.А., Тарановская Е.А., Самигуллин Н.Р.* Дорожные ограждения, рассеивающие энергию удара // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 26–4. С. 69–71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT.
7. *Тавшавадзе Б.Т.* Разработка и обоснование методологии расчетов, испытаний и сертификации дорожных удерживающих ограждений барьерного типа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2019. 147 с. EDN CNLKWQ.
8. *Карпов И.А.* Механика конструкций тросовых дорожных ограждений при ударном взаимодействии с транспортным средством и разработка математических моделей расчета : дис. ... канд. техн. наук. М., 2021. 151 с. EDN YANQXS.
9. *Демьянушко И.В., Карпов И.А., Тавшавадзе Б.Т., Титов О.В., Михеев П.С., Самигуллин Л.Ф.* Цифровое моделирование механики поведения энергопоглощающих элементов дорожных фронтальных ограждений при ударе // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2023. № 3 (74). С. 20–30. EDN FIWFLE.
10. *Borovinšek M., Vesenjāk M., Ulbin M., Ren Z.* Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers // Engineering Failure Analysis. 2007. Vol. 14. Issue 8. Pp. 1711–1718. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.068
11. *Тавшавадзе Б.Т., Локуть А.Г.* Перспектива применения парапетных дорожных ограждений. Современные методы их расчета // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2022. № 2 (32). EDN SZMJSM.
12. *Кисельков А.Л., Шукюров А.О.* Методические рекомендации к расчетной оценке прочности дорожных ограждений на основе компьютерного моделирования процессов // Актуальные вопросы машиноведения. 2020. Т. 9. С. 124–130. EDN WSJTHE.
13. *Mohan P., Marzougui D., Meczowski L., Bedewi N.* Finite element modeling and validation of a 3-strand cable guardrail system // International Journal of Crashworthiness. 2005. Vol. 10. Issue 3. Pp. 267–273. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0345
14. *Tran Thanh T., Tso-Liang T.* Analysis of truck crashes with W-beam guardrail // Acta Technica Jaurinensis. 2023. Vol. 16. Issue 3. Pp. 107–115. DOI: 10.14513/actatechjaur.00690
15. *Gheres M.I., Scurtu I.L.* Crash testing and evaluation of W-beam guardrail using finite elements method // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1220. Issue 1. P. 012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1220/1/012049
16. *Демьянушко И.В., Карпов И.А., Михеев П.С., Мухаметова А.А.* Цифровое моделирование работы мобильного фронтального устройства с прогнозируемым разрушением // XXXII Междунар. инновационная конф. молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения : сб. тр. конф. 2021. С. 48–53. EDN YVKVJB.
17. *Ray M.H., Plaxico C.A., Engstrand K.* Performance of W-beam splices // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2001. Vol. 1743. Issue 1. Pp. 120–125. DOI: 10.3141/1743-16
18. *Бургер И.А., Мавлютов П.Р.* Сопrotивление материалов : учебное пособие. М. : Наука, 1986. 560 с.
19. *Монахов А.Д., Гуляев М.М., Гладышева Н.Е., Коптельцева О.Ю., Автаев В.В., Яковлев Н.О. и др.* Применение метода корреляции цифровых изображений для построения диаграмм деформирования в истинных координатах // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2023. Т. 29. № 3. С. 79–88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88. EDN KIDSEJ.
20. *Ilg C., Liebold C., Sreenivasa V., Haufe A., Karadogan C., Liewald M.* Displacement based simulation and material calibration based on digital image cor-

relation part II — application // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2023. Vol. 1284. Issue 1. P. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1284/1/012056

21. *Ilg C., Witowski K., Koch D., Roehl Suanno P., Haufe A.* Constitutive model parameter identification via full-field calibration // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 651. Issue 1. P. 012070. DOI: 10.1088/1757-899X/651/1/012070

22. *Васильев Б.Е., Волков М.Е., Бредихина Е.Н., Плещеев И.И.* Построение расчетных кривых деформирования в обеспечение наполнения банка данных по конструкционной прочности материалов авиационных двигателей // Materials Physics and Mechanics. 2019. Т. 42. № 5. С. 656–670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19. EDN KHEMRA.

23. *Cao J., Li F., Ma W., Li D., Wang K., Ren J. et al.* Constitutive equation for describing true stress–strain curves over a large range of strains // Philosophical Magazine Letters. 2020. Vol. 100. Issue 10. Pp. 476–485. DOI: 10.1080/09500839.2020.1803508

24. *Chen J.J., Lian C.W., Lin J.P.* Validation of constitutive models for experimental stress-strain relationship of high-strength steel sheets under uniaxial tension // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 668. Issue 1. P. 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/668/1/012013

25. *Tu S., Ren X., He J., Zhang Z.* Stress–strain curves of metallic materials and post-necking strain hard-

ening characterization: A review // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2019. Vol. 43. Issue 1. Pp. 3–19. DOI: 10.1111/ffe.13134

26. *Zeng X., Wu W., Zou J., Elchalakani M.* Constitutive model for equivalent stress-plastic strain curves including full-range strain hardening behavior of high-strength steel at elevated temperatures // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 22. P. 8075. DOI: 10.3390/ma15228075

27. *Hockett J.E., Sherby O.D.* Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperature // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 1975. Vol. 23. Issue 2. Pp. 87–98. DOI: 10.1016/0022-5096(75)90018-6

28. *Meißner P., Winter J., Vietor T.* Methodology for neural network-based material card calibration using LS-DYNA MAT_187_SAMP-1 considering failure with GISSMO // Materials. 2022. Vol. 15. Issue 2. P. 643. DOI: 10.3390/ma15020643

29. *Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F.* An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction // International Journal of Fracture. 2016. Vol. 200. Issue 1–2. Pp. 127–150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2

30. *Johnson G.R., Cook W.H.* Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures // Engineering Fracture Mechanics. 1985. Vol. 21. Issue 1. Pp. 31–48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

Поступила в редакцию 12 сентября 2024 г.

Принята в доработанном виде 16 сентября 2024 г.

Одобрена для публикации 11 октября 2024 г.

Об авторах: **Ирина Вадимовна Демьянушко** — доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Олег Вадимович Титов — старший преподаватель кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 966854, Scopus: 57214069454, ResearcherID: IWU-9537-2023, ORCID: 0000-0002-0401-8326; gaqui4@yandex.ru;

Павел Сергеевич Михеев — кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 1037466, Scopus: 57216146601, ResearcherID: AEE-1037-2022, ORCID: 0000-0003-0760-2138; psmikheev95@gmail.com;

Илья Анатольевич Карпов — кандидат технических наук, доцент кафедры строительной механики; **Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)**; 125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, д. 64; РИНЦ ID: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com.

Вклад авторов:

Демьянушко И.В. — научное руководство, редактирование итогового текста.

Титов О.В. — написание текста, идентификация и калибровка параметров для моделей материалов и модели поврежденности, идея поэтапной валидации, проведение стендовых натурных и виртуальных испытаний элементов, построение валидированных цифровых моделей исследованных элементов, разработка цифровых моделей барьерного и фронтального ограждений, проведение виртуальных краш-тестов ограждений, обработка результатов.

Михеев П.С. — участие в проведении стендовых натурных испытаний элементов, разработка цифровой модели автомобиля прикрытия (АП), разработка цифровой модели фронтального ограждения.
Карпов И.А. — редактирование текста, разработка цифровой модели фронтального ограждения, проведение виртуальных краш-тестов, обработка результатов.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Storozhev S.A., Loginov V.Yu., Aristarkhova A.N. The impact of road barriers certification on road safety. *Road Safety*. 2022; 2:52-56. EDN OWTHRQ. (rus.).
2. Andreev K.P., Borychev S.N., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. Road barriers: modern solutions for improving traffic safety. *Truck*. 2021; 6:43-48. EDN JXOXJJ. (rus.).
3. Andreev K.P., Terentyev V.V., Shemyakin A.V. The use of energy-absorbing traffic guardrail to improve traffic safety. *Transport. Transport facilities. Ecology*. 2018; 1:5-12. DOI: 10.15593/24111678/2018.01.01. EDN YVGQRA. (rus.).
4. Qiao W., Huang E., Guo H., Liu Y., Ma X. Barriers involved in the safety management systems: a systematic review of literature. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022; 19(15):9512. DOI: 10.3390/ijerph19159512
5. Sungatullina K.A. Conditions and factors affecting road safety at the present stage. *Vestnik NTsBZhd*. 2022; 2(52):126-135. EDN UKXUKI. (rus.).
6. Dergunov S.A., Orekhov S.A., Taranovskaya E.A., Samigullin N.R. Road barriers that dissipate impact energy. *Trends in the Development of Science and Education*. 2017; 26-4:69-71. DOI: 10.18411/lj-31-05-2017-72. EDN ZCNFPT. (rus.).
7. Tavshavadze B.T. *Development and justification of a methodology for calculations, testing and certification of barrier-type road restraint barriers : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2019; 147. EDN CNLKWQ. (rus.).
8. Karpov I.A. *Mechanics of cable road barrier structures during impact interaction with a vehicle and development of mathematical calculation models : dis. ... cand. of technical sciences*. Moscow, 2021; 151. EDN YANQXS. (rus.).
9. Demiyanyushko I.V., Karpov I.A., Tavshavadze B.T., Titov O.V., Mikheev P.S., Samigullin L.F. Virtual digital modelling of the operation energy-absorbing elements of frontal road barriers. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*. 2023; 3(74):20-30. EDN FIWFLE. (rus.).
10. Borovinšek M., Vesenjāk M., Ulbin M., Ren Z. Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis*. 2007; 14(8):1711-1718. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2006.11.068
11. Tavshavadze B.T., Lokit A.G. Prospect of application of concrete road barrier. Modern methods for their calculation. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2022; 2(32). EDN SZMJSM. (rus.).
12. Kiselkov A.L., Shukurov A.O. Guidelines for calculating the strength of road barriers based on computer simulation of processes. *Topical Issues of Mechanical Engineering*. 2020; 9:124-130. EDN WSJTJE. (rus.).
13. Mohan P., Marzougui D., Meczkowski L., Bedewi N. Finite element modeling and validation of a 3-strand cable guardrail system. *International Journal of Crashworthiness*. 2005; 10(3):267-273. DOI: 10.1533/ijcr.2005.0345
14. Tran Thanh T., Tso-Liang T. Analysis of truck crashes with W-beam guardrail. *Acta Technica Jaurinensis*. 2023; 16(3):107-115. DOI: 10.14513/actatech-jaur.00690
15. Gheres M.I., Scurtu I.L. Crash testing and evaluation of W-beam guardrail using finite elements method. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2022; 1220(1):012049. DOI: 10.1088/1757-899X/1220/1/012049
16. Demiyanyushko I.V., Karpov I.A., Mikheev P.S., Mukhametova A.A. Virtual modelling of the crash cushion operation with projected destruction. *XXXII International innovative conference of young scientists and students on problems of mechanical engineering : collection of conference proceedings*. 2021; 48-53. EDN YVKVJB. (rus.).
17. Ray M.H., Plaxico C.A., Engstrand K. Performance of W-beam splices. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2001; 1743(1):120-125. DOI: 10.3141/1743-16
18. Birger I.A., Mavlyutov R.R. *Strength of materials : tutorial*. Moscow, Nauka, 1986; 560. (rus.).
19. Monakhov A.D., Gulyaev M.M., Gladysheva N.E., Kopteltseva O.Yu., Avtaev V.V., Yakovlev N.O. et al. Using the method of correlation of digital images for plotting stress-strain curves in true coordinates. *Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2023; 29(3):79-88. DOI: 10.17073/0021-3438-2023-3-79-88. EDN KIDSEJ. (rus.).
20. Ilg C., Liebold C., Sreenivasa V., Haufe A., Karadogan C., Liewald M. Displacement based simulation and material calibration based on digital image correlation part II — application. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2023; 1284(1):012056. DOI: 10.1088/1757-899X/1284/1/012056

21. Ilg C., Witowski K., Koch D., Roehl Suanno P., Haufe A. Constitutive model parameter identification via full-field calibration. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 651(1):012070. DOI: 10.1088/1757-899X/651/1/012070
22. Vasilyev B.E., Volkov M.E., Bredihina E.N., Pleshcheev I.I. Construction of stress-strain curves for aviation materials database formation. *Materials Physics and Mechanics*. 2019; 42(5):656-670. DOI: 10.18720/MPM.4252019_19. EDN KHEMRA. (rus.).
23. Cao J., Li F., Ma W., Li D., Wang K., Ren J. et al. Constitutive equation for describing true stress-strain curves over a large range of strains. *Philosophical Magazine Letters*. 2020; 100(10):476-485. DOI: 10.1080/09500839.2020.1803508
24. Chen J.J., Lian C.W., Lin J.P. Validation of constitutive models for experimental stress-strain relationship of high-strength steel sheets under uniaxial tension. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*. 2019; 668(1):012013. DOI: 10.1088/1757-899X/668/1/012013
25. Tu S., Ren X., He J., Zhang Z. Stress-strain curves of metallic materials and post-necking strain hardening characterization: a review. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019; 43(1):3-19. DOI: 10.1111/ffe.13134
26. Zeng X., Wu W., Zou J., Elchalakani M. Constitutive Model for Equivalent Stress-Plastic Strain Curves Including Full-Range Strain Hardening Behavior of High-Strength Steel at Elevated Temperatures. *Materials*. 2022; 15(22):8075. DOI: 10.3390/ma15228075.
27. Hockett J.E., Sherby O.D. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperature. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1975; 23(2):87-98. DOI: 10.1016/0022-5096(75)90018-6
28. Meißner P., Winter J., Vietor T. Methodology for neural network-based material card calibration using LS-DYNA MAT_187_SAMP-1 considering failure with GISSMO. *Materials*. 2022; 15(2):643. DOI: 10.3390/ma15020643
29. Andrade F.X.C., Feucht M., Haufe A., Neukamm F. An incremental stress state dependent damage model for ductile failure prediction. *International Journal of Fracture*. 2016; 200(1-2):127-150. DOI: 10.1007/s10704-016-0081-2
30. Johnson G.R., Cook W.H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. *Engineering Fracture Mechanics*. 1985; 21(1):31-48. DOI: 10.1016/0013-7944(85)90052-9

Received September 12, 2024.

Adopted in revised form on September 16, 2024.

Approved for publication on October 11, 2024.

BIOSNOTES: **Irina V. Demiyanshko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 158270, Scopus: 6602540287, ResearcherID: G-5604-2013, ORCID: 0000-0001-6726-1131; demj-ir@mail.ru;

Oleg V. Titov — senior lecturer of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 966854, Scopus: 57214069454, ResearcherID: IWU-9537-2023, ORCID: 0000-0002-0401-8326; gaqui4@yandex.ru;

Pavel S. Mikheev — Candidate of Technical Sciences, senior lecturer of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 1037466, Scopus: 57216146601, ResearcherID: AEE-1037-2022, ORCID: 0000-0003-0760-2138; psmikheev95@gmail.com;

Ilya A. Karpov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Structural Mechanics; **Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI)**; 64 Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russian Federation; ID RSCI: 971215, Scopus: 57209366542, ResearcherID: AAL-8344-2021, ORCID: 0000-0003-2574-2839; ilya.karpov@outlook.com.

Contribution of the authors:

Irina V. Demiyanshko — scientific guidance, editing the final version of the text.

Oleg V. Titov — writing the text, identification and calibration parameters of materials models and damage model, idea of step-by-step validation, carrying out full-scale and virtual bench tests of elements, development of validated digital models of the studied elements, development of digital models of guardrail barrier and crush cushion, carrying out virtual crash tests of barriers, processing of results.

Pavel S. Mikheev — participation in carrying out full-scale bench tests of elements, development of digital model of cover vehicle (CV), development of digital model of crush cushion.

Ilya A. Karpov — editing of the text, development of digital model of crush cushion, carrying out virtual crash tests of barriers, processing of results.

The authors declare no conflict of interest.