

МАШИНОСТРОЕНИЕ И ТРАНСПОРТ: ТЕОРИЯ, ТЕХНОЛОГИИ, ПРОИЗВОДСТВО

УДК 623.113

DOI 10.46960/1816-210X_2025_4_93

EDN BQANYJ

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЛИБРОВОЧНОГО ИСПЫТАНИЯ ШЕИ МАНЕКЕНА WORLDSID

Д.А. Жителев

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: daniil.zhitelev@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия**А.И. Рожков**

ORCID: 0009-0004-6560-0864 e-mail: aleksandr.rozhkov@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия**Д.Ю. Солопов**

ORCID: 0009-0008-5206-327X e-mail: dmitriy.solopov@nami.ru

Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»
Москва, Россия

Представлено моделирование калибровочного испытания шеи антропоморфного манекена WorldSID, применяемого для оценки пассивной безопасности транспортных средств при боковом ударе. Проведена валидация конечно-элементной модели (КЭМ) шеи, находящейся в открытом доступе – первый шаг к созданию комплексной методики расчетов пассивной безопасности. Описана методика построения КЭМ испытательного маятникового стенда, соответствующего требованиям стандарта ISO 15830. Проведено численное моделирование испытания с использованием программных средств LS-DYNA. Результаты расчетов сопоставлены с калибровочными диапазонами и эталонной моделью LSTC. По ряду показателей достигнута сходимость, однако зафиксированы расхождения по максимальному моменту и времени затухания угла поворота головы манекена. Установлено влияние плотности сотового блока и жесткости шеи на результат. Предложены направления доработки модели для повышения соответствия нормативным критериям. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований в области валидации КЭМ манекенов.

Ключевые слова: манекен; калибровочные испытания; шея манекена; WorldSID; моделирование; пассивная безопасность; LS-Dyna.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Жителев, Д.А. Моделирование калибровочного испытания шеи манекена WorldSID / Д.А. Жителев, А.И. Рожков, Д.Ю. Солопов // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2025. № 4. С. 93-108. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_93 EDN: BQANYJ

SIMULATION OF WORLDSID DUMMY NECK CALIBRATION TEST

D.A. Zhitelev

ORCID: 0000-0002-8080-1419 e-mail: daniil.zhitelev@nami.ru

Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia

A.I. RozhkovORCID: 0009-0004-6560-0864 e-mail: aleksandr.rozhkov@nami.ruCentral Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia**D.Yu. Solopov**ORCID: 0009-0008-5206-327X e-mail: dmitriy.solopov@nami.ruCentral Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute NAMI
Moscow, Russia

Abstract. The article presents a simulation of the neck calibration test of the anthropomorphic WorldSID dummy used to evaluate the passive safety of vehicles in the side impacts scenarios. The first step towards the creation of a comprehensive methodology for calculating passive safety was the validation of a finite element model (FEM) of the neck, which is publicly available. The methodology for constructing a FEM of the pendulum test bench that meets the requirements of ISO 15830 is described. Numerical modeling of the test was carried out using LS-DYNA software. The calculation results are compared with the calibration ranges and the LSTC reference model. Convergence was achieved for a number of indicators, but discrepancies were recorded in the maximum moment and time of attenuation of the head rotation angle. The influence of the honeycomb block density and neck rigidity on the result was established. Directions for improving the model to improve compliance with regulatory criteria are proposed. Further research in the area of validation of dummies FEMs is needed.

Key words: dummy; calibration tests; dummy neck; WorldSID; simulation; passive safety; LS-Dyna.

FOR CITATION: D.A. Zhitelev, A.I. Rozhkov, D.Yu. Solopov. Simulation of WorldSID dummy neck calibration test. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 4. Pp. 88-103. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_4_88 EDN: BQANYJ

Введение

Актуальность вопросов пассивной безопасности транспортных средств неуклонно возрастает в связи с ростом количества автомобилей. По состоянию на 2023 г. число автомобилей в мире составляет 1,4 млрд, что на 12 % больше, чем пять лет назад [1]. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях погибает около 1,19 млн чел. [2]. Для объективной оценки уровня пассивной безопасности транспортных средств применяются краш-тесты, в которых используются антропоморфные испытательные устройства – манекены. Эти устройства позволяют количественно оценивать риск получения травм водителем и пассажирами при различных сценариях аварий. Конечно-элементные модели (КЭМ) антропоморфных манекенов являются важнейшим инструментом для численного анализа систем пассивной безопасности. Тем не менее в России отсутствуют систематические исследования, посвященные применению КЭМ манекенов в данной области. Существуют модели манекенов, находящиеся в открытом доступе. Основной их проблемой является обеспечение сходимости результатов моделирования с экспериментом. В связи с этим, нашей задачей является проведение валидации модели манекена, находящейся в открытом доступе, как первого шага к созданию полноценной методологии расчетов пассивной безопасности с использованием виртуальных моделей.

Одним из наиболее широко используемых манекенов является WorldSID, предназначенный для оценки последствий бокового удара. После каждой серии физических испытаний манекен проходит калибровку – серию тестов отдельных компонентов, цель которых – убедиться в соответствии их характеристик нормативным диапазонам. КЭМ, применяемые в виртуальных испытаниях, также подлежат калибровке с целью оценки точности и воспроизводимости результатов [3]. В стандарте ISO 15830-2:2022 описаны калибровочные испытания, проводимые для манекена WorldSID: удар по голове, маятниковое испытание шеи на изгиб, удар бревном по грудной клетке, нагружение плеча, сжатие таза и деформация бедра [4]. В рамках настоящей работы моделируется испытание шеи на изгиб, поскольку данный компонент критически важен для воспроизведения кинематики головы при боковом ударе.

Излагается методика разработки КЭМ испытательного стенда, приводятся результаты численного моделирования нагружения шеи КЭМ манекена с оценкой сходимости с результатами калибровочных испытаний, а также результаты расчетов выбранной в качестве эталонной модели разработки компании LSTC.

Описание методики проведения испытаний

Объектом исследования является КЭМ манекена WorldSID, предназначенного для оценки пассивной безопасности при боковых столкновениях. На рис. 1 представлена сборка модели.

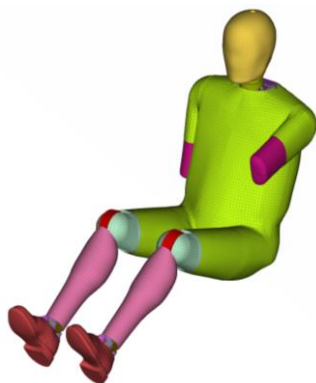


Рис. 1. КЭМ манекена для боковых ударов «WorldSID»

Fig. 1. FEM of the WorldSID side impact dummy

Для испытания по калибровке шеи используется маятниковый стенд: маятник с установленной на нем шеей ударяется о сотовый блок со скоростью 3,4 м/с (рис. 2, а). В ходе испытания фиксируются углы поворота шеи и момент, возникающий в нагрузочной ячейке (рис. 2 б). Параметры маятника (масса, геометрия, материалы) регламентированы в SAE J2856-2022 [5, с. 48]. Вместо головы манекена применяются две стальные пластины, воспроизводящие ее массово-инерционные характеристики. Точные размеры отсутствуют в ISO 15830-2, поэтому они были воссозданы по значениям, указанным в [4 с. 3]. Конструкция представлена на рис. 2.

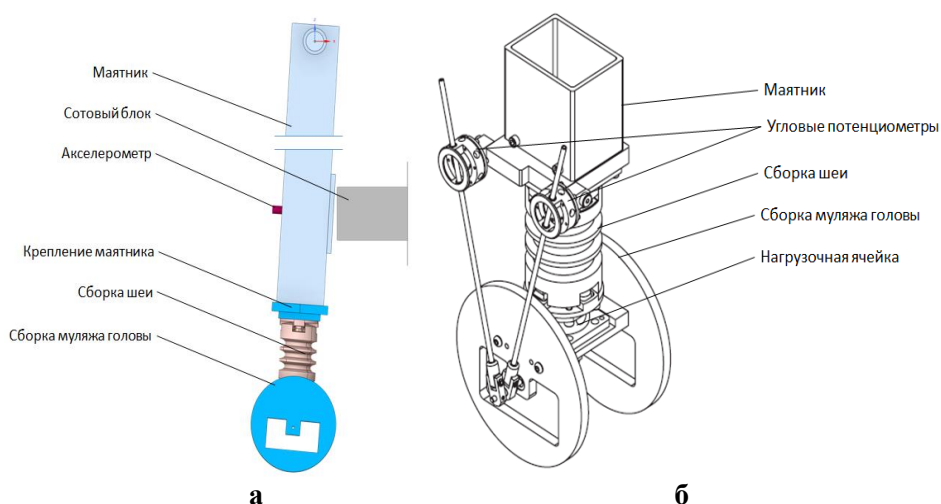


Рис. 2. Сборка маятника для испытания шеи:
а – общий вид сборки, б – шея с измерительными приборами

Fig. 2. Assembling a pendulum for neck testing:
а – general view; б – neck with measuring instruments

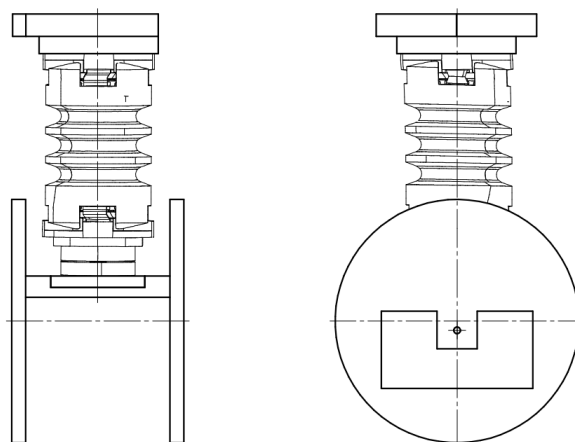


Рис. 3. Схема сборки муляжа головы

Fig. 3. Assembly diagram of the head dummy

Описание конечно-элементной модели манекена

Используемая в работе модель манекена WorldSID была скачана из базы данных компании LSTC (разработчик LS-DYNA, входящий в состав корпорации ANSYS) в виде общедоступного файла [6]. Она свободна для пользователей с действующей лицензией без дополнительной платы. Перед созданием сборки были извлечены компоненты шеи из полной модели манекена. В табл. 1 приведен список идентификаторов PartID, соответствующих этим компонентам.

Таблица 1.

Перечень компонентов модели шеи манекена для экспорта

Table 1.

List of dummy neck components for export

PID	Название компонента
5000004	NECK_LOADCELL
5000005	HEAD_NECK_INTERFACE_PLATE
5000011	HALF_SPHERICAL_SCREW1
5000014	HALF_SPHERICAL_SCREW2
5000015	NECK_INTERMEDIATE_PLATE1
5000016	NECK_INTERMEDIATE_PLATE2
5000017	NECK_RUBBER
5000018	NECK_TORSO_INTERFACE_PLATE
5000007	FLEXION_EXTENSION_BUFFER
5000008	FLEXION_EXTENSION_BUFFER
5000009	NECK_BUFFER1
5000010	NECK_BUFFER2
5000012	NECK_BUFFER3
5000013	NECK_BUFFER4

В исходной модели шея изогнута для имитации посадки (рис. 4, а), но для целей калибровки она выпрямляется при помощи «морфинга», а затем разворачивается в нужную ориентацию (рис. 4, б).

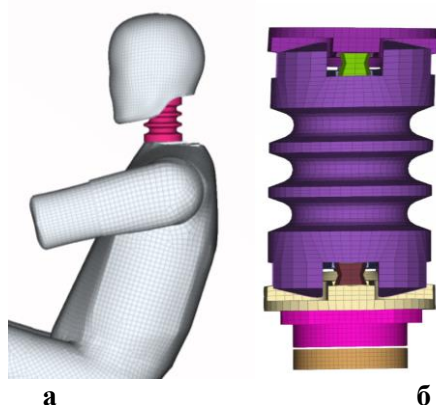


Рис. 4. Извлечение шеи из общей сборки манекена:

а – общая сборка манекена, б – извлеченная шея

Fig. 4. Extracting the neck from the general assembly of the dummy:

a – general assembly of the dummy; б – extracted neck

Для обеспечения корректности результатов валидации необходимо, в первую очередь, откалибровать испытательный стенд, в частности – блок энергопоглощения (сотовый блок). Согласно стандарту ISO 15830, замедление маятника стенда должно быть регламентировано в рамках заданного коридора и не зависит от характеристик самой шеи. Сотовые блоки часто используются в качестве элементов для контролируемого замедления при калибровочных и краш-испытаниях. Такие структуры обеспечивают необходимое энергопоглощение и позволяют достичь требуемых характеристик замедления при ударе. Применение сотовых и аналогичных энергопоглощающих элементов для обеспечения контролируемого замедления при боковых ударах подробно рассмотрено в работе [7], где приводится моделирование поведения защитных структур транспортного средства при боковом столкновении с опорой. Таким образом, на достижение заданного замедления влияет не модель шеи, а параметры сотового блока, выполняющего функцию элемента демпфирования. На начальном этапе проводится подбор характеристик материала и геометрии блока так, чтобы замедление соответствовало калибровочному диапазону. В стандарте ISO 15830 значения замедления маятника представлены в виде отдельной таблицы и рассматриваются отдельно от остальных контролируемых параметров шеи.

В качестве сотового блока принята часть деформируемого барьера *Offset Deformable Barrier* (Solid version) (рис. 5) [8]. Размеры сотового блока соответствуют регламентированным значениям SAE J2856-2022. Элементы сотового блока связаны с жесткой неподвижной пластиной основания.

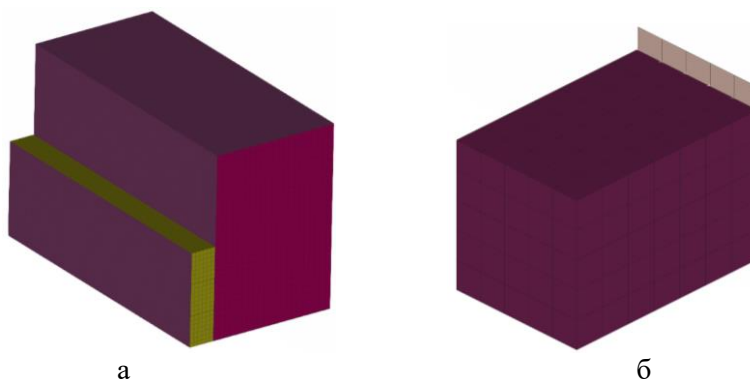


Рис. 5. Применение Offset Deformable Barrier:

а – исходный деформируемый барьер, б – сотовый блок

Fig. 5. Offset Deformable Barrier usage:

a – initial deformable barrier; б – honeycomb block

КЭМ испытательного стенда с шеей описывается двумя типами элементов: SECTION_SHELL и SECTION_SOLID [9]. На рис. 6 цветовая маркировка элементов соответствует типу примененного материала.

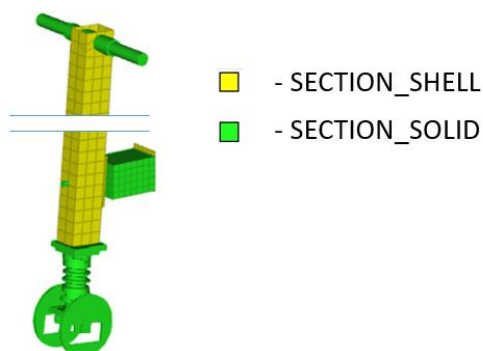


Рис. 6. Типы элементов КЭМ испытательного стенда

Fig. 6. Types of elements of the test bench FEM

В КЭМ используется три типа материалов. Абсолютно жесткий материал MAT20 MAT_RIGID – недеформируемый материал, который используется для моделирования компонентов, где важны только конструктивные особенности и массово-инерционные характеристики, поэтому в данном случае ключевым параметром для этих материалов является плотность [10, с. 2-213]. Как видно из табл. 2, для алюминиевого сплава 6061-T6 применяется две карты с различными значениями плотности. Это сделано для обеспечения заданных в ISO15830-2:2022 массово-инерционных характеристик. Два других типа материалов (MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM и MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB) представляют собой деформируемые модели материала. MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB используется для моделирования сложной сотовой структуры блока и имеет нелинейную характеристику. При помощи линейного MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM задаются характеристики неметаллических частей шеи. Подробно эти два типа материала не рассматриваются, так как их характеристики заданы в исходных моделях шеи и деформируемого барьера. На рис. 7 представлена полная КЭМ испытательного стенда в цветах, соответствующих назначенному материалу.

Таблица 2.

Список материалов КЭМ испытательного стенда

Table 2.

List of materials for the test bench

Цвет	Название материала	Плотность, т/мм ³	Тип материала
	0.342 MPa (third yield surface with hydrostatic yield)	5.12E-11	MAT126 MAT_MODIFIED_HONEYCOMB
	NATURAL RUBBER	1.1E-9	MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM
	BLACK NITRILE RUBBER	1.1E-9	MAT62 MAT_VISCOUS_FOAM
	backplate (fixed)	7.89E-12	MAT20 MAT_RIGID
	6061-T6 ALUMINUM	2.7E-9	MAT20 MAT_RIGID
	6061-T6 ALUMINUM	3.2E-9	MAT20 MAT_RIGID
	4140 STEEL	5.5E-9	MAT20 MAT_RIGID
	080M40 STEEL	7.2E-9	MAT20 MAT_RIGID
	STEEL_BRACKET	7.85E-9	MAT20 MAT_RIGID
	303 SS	8.5E-9	MAT20 MAT_RIGID

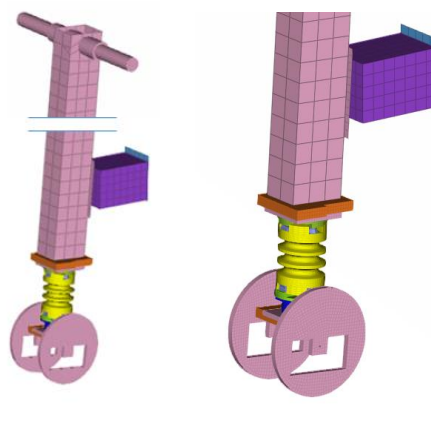


Рис. 7. Материалы КЭМ испытательного стенда

Fig. 7. Materials of the test bench FEM

В сборке маятника используется несколько видов связей: контакты, дополнительные узлы и шарниры. На рис. 8 представлен вращательный шарнир `CONSTRAINED_JOINT_REVOLUTE`, соединяющий маятник и его ось [9, с. 10-64]. Шарнир имеет нулевую жесткость и демпфирование.

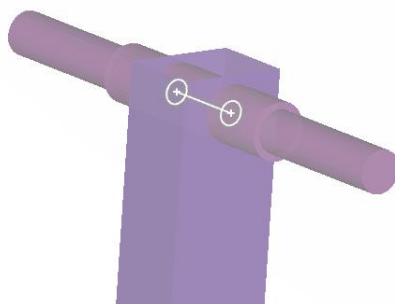


Рис. 8. Вращательный шарнир маятника

Fig. 8. Pendulum pivot joint

На рис. 9 представлены сферические шарниры `CONSTRAINED_JOINT_SPHERICAL`, использующие для сборки системы замера углов с потенциометрами. Для каждого стержня используется по два шарнира. Шарниры также имеют нулевую жесткость и демпфирование.

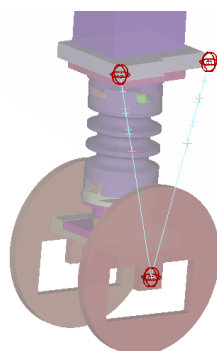


Рис. 9. Сферические шарниры маятника

Fig. 9. Spherical pendulum joints

Для соединения центра масс головы и основания шеи используются стержни. С их же помощью обеспечивается поворот потенциометров, установленных на основании. В КЭМ эти стержни моделируются при помощи `CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` (рис.10, а) [9, с. 10-138]. В оригинальной конструкции, чтобы не ограничивать изгиб шеи при испытании, допускается продольное перемещение стержней перпендикулярно оси потенциометра. В модели применяется по два стержня на сторону, между которыми установлен цилиндрический шарнир `CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL` (рис. 10, б) [9, с. 10-65].

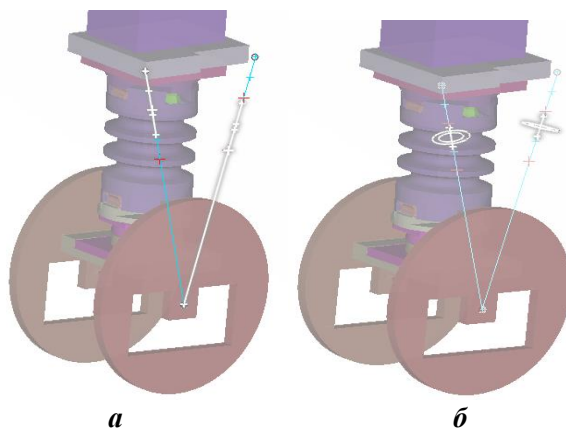


Рис. 10. Сборка КЭМ узла для измерения углов:

*а – `CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY`,
б – `CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL`*

Fig. 10. Assembly of the FEM of the unit for measuring angles:

*а – `CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY`,
б – `CONSTRAINED_JOINT_CYLINDRICAL`*

Для связи компонентов, описанных материалом типа `MAT_RIGID`, используется `CONSTRAINED_NODAL_RIGID_BODY` (рис.11) [9, с. 10-157]. При помощи данной функции моделируется абсолютно жесткая связь между телами. Между деформируемыми элементами конструкции, ударной пластиной маятника и сотовым блоком создается контакт формулировки `CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE` (рис. 12, а, с коэффициентами динамического и статического трения, равными 0,3, коэффициентом вязкого демпфирования, равным 40 [9, с. 11-157]. Для компонентов шеи создается общий контакт формулировки `CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE` (рис. 12, б) с коэффициентами динамического и статического трения, равными 0,15, коэффициентом вязкого демпфирования, равным 20 %.

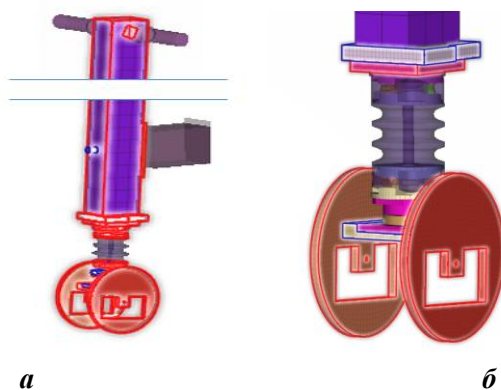


Рис. 11. Применение `CONSTRAINED_RIGID_BODY`:

а – общий вид сборки, б – три пары связанных элементов

Fig. 11. `CONSTRAINED_RIGID_BODY` usage:

а – general view; б – 3 pairs of connected elements

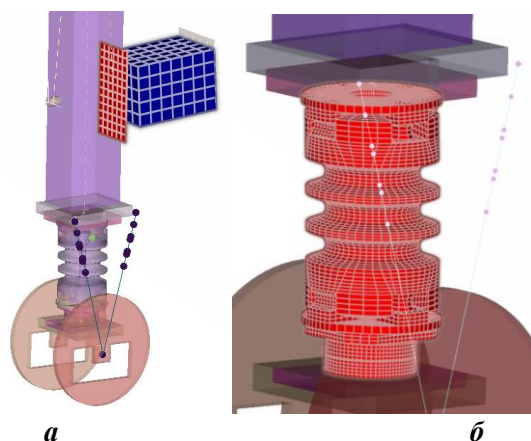


Рис. 12. Применяемые в модели контакты:

a – контакт ударной пластины и сотового блока, б – общий контакт шеи

Fig. 12. Contacts used in the model:

a – contact of the impact plate and the honeycomb block, б – general neck contact

Для контроля параметров и получения результатов моделирования используются угловые потенциометры, которые показаны на рис. 9 и 10, датчик ускорений и датчик момента. Датчик ускорений задается при помощи функции DATABASE_HISTORY_NODE_LOCAL [9, с. 16-100]. В карте обозначается узел, ускорение которого будет измеряться, а также заранее заданная локальная система координат, ось X которой со направлена оси датчика, а ось Z со направлена основной трубе маятника (рис. 13).

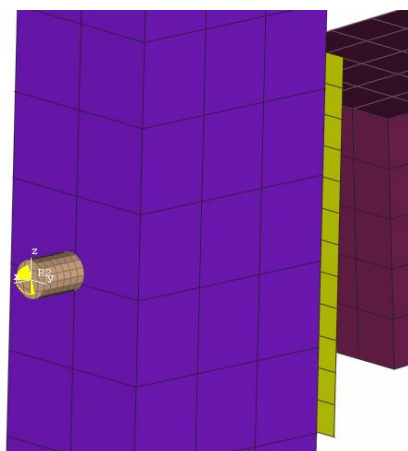


Рис. 13. Датчик ускорений

Fig. 13. Acceleration sensor

Датчик момента задается при помощи балочного элемента ELEMENT_BEAM_ELFORM_6 [9, с. 19]. В карте задаются узлы, между которыми строится элемент, PartID, а также номер узла, в направлении которого будет направлена одна из осей локальной системы координат элемента. Материал элемента – MAT_LINEAR_ELASTIC_DISCRETE_BEAM – с высокой заданной жесткостью по всем степеням свободы [10, с. 2-463]. Узлы, по которым задается балочный элемент, при помощи CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE привязываются к сборке шеи и нагрузочному элементу (рис.14, а) [9, с. 10-20] Результат моделирования выводится при помощи функции DATABASE_HISTORY_BEAM [9, с. 16-100]. На рис. 14, б представлен общий вид датчика для вывода результатов.

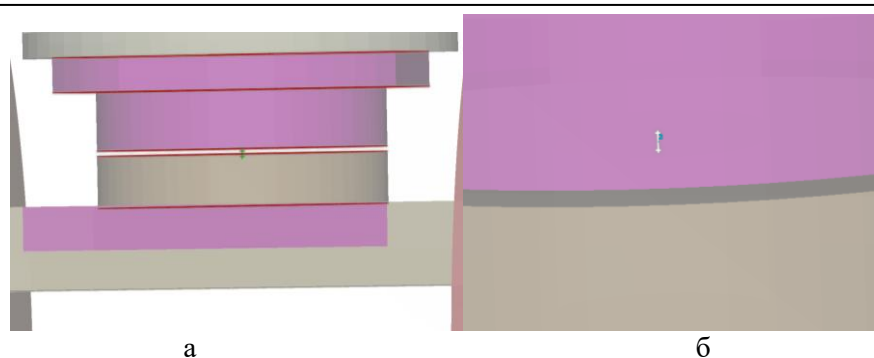


Рис. 14. Датчик момента:

a – CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE, б – общий вид датчика

Fig. 14. Torque sensor:

a – CONSTRAINED_EXTRA_NODES_NODE, б – general view

Результаты моделирования

По результатам расчета получена картина деформированного состояния модели, а также данные с заранее обозначенных датчиков. На рис. 3 показана раскадровка удара маятника о сотовый блок.

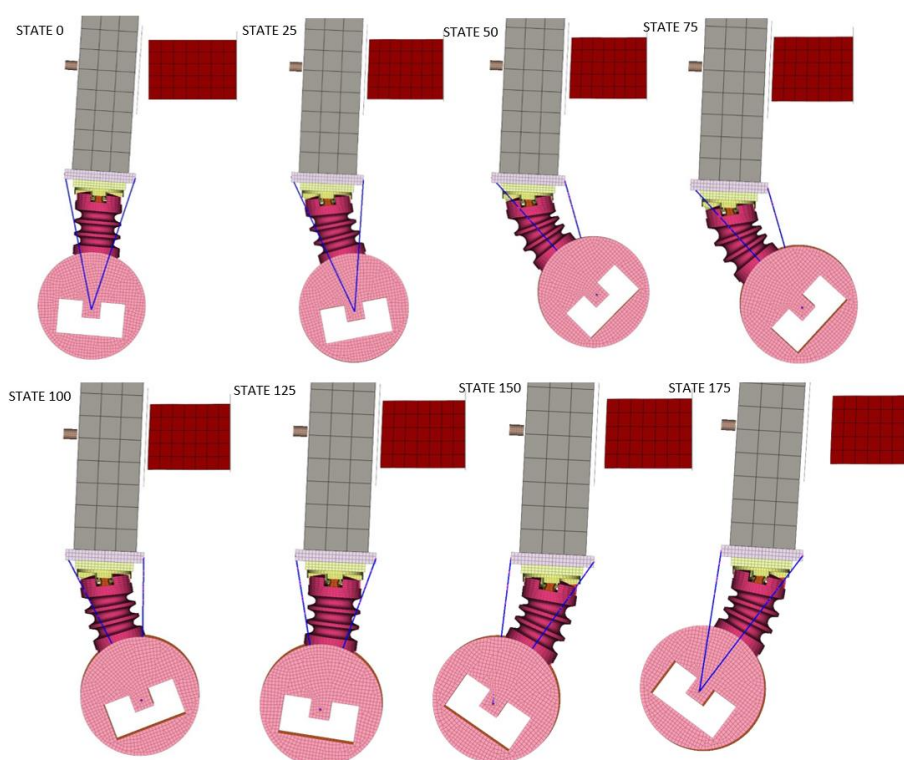


Рис. 15. Раскадровка моделирования испытания

Fig. 15. Test simulation storyboard

Результаты моделирования испытания шеи обрабатываются в соответствии с ISO15830-2:2022 [4, с. 16]. На первом этапе экспортируется ускорение узла акселерометра в направлении оси X в локальной системе координат (рис. 16). Данные значения фильтруются по CFC1000. Точка 0 мс соответствует первичному ускорению маятника 5g. Стоит отметить, что в руководстве к модели LSTC, несмотря на требования ISO15830-2:2022, указана фильтрация CFC060, что значительно сказывается на результате моделирования.

Следующим этапом график ускорения интегрируется (рис. 17). Значения скорости должны соответствовать значениям калибровочных диапазонов. В табл. 3 представлены значения скорости маятника в моменты 4, 8 и 12 мс, а также требуемый диапазон значений скорости. Все значения соответствуют калибровочным диапазонам.

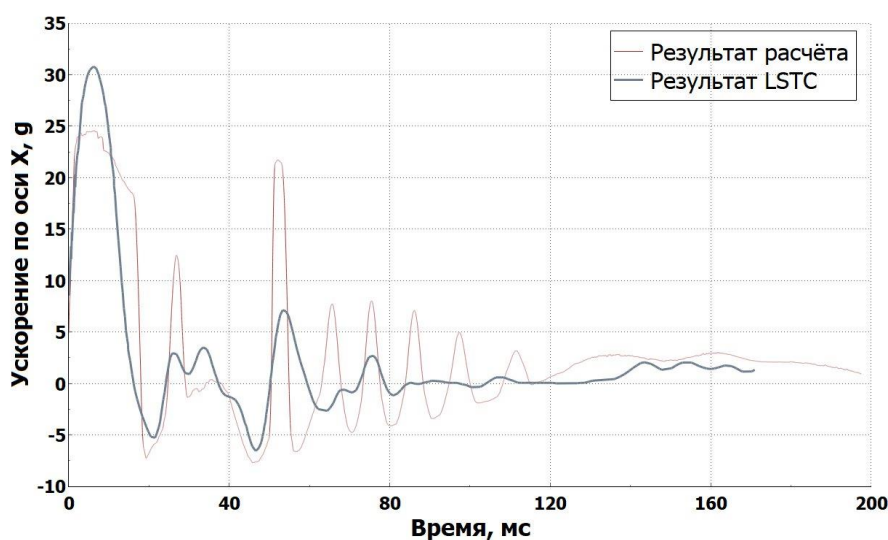


Рис. 16. Ускорение маятника

Fig. 16. Pendulum acceleration

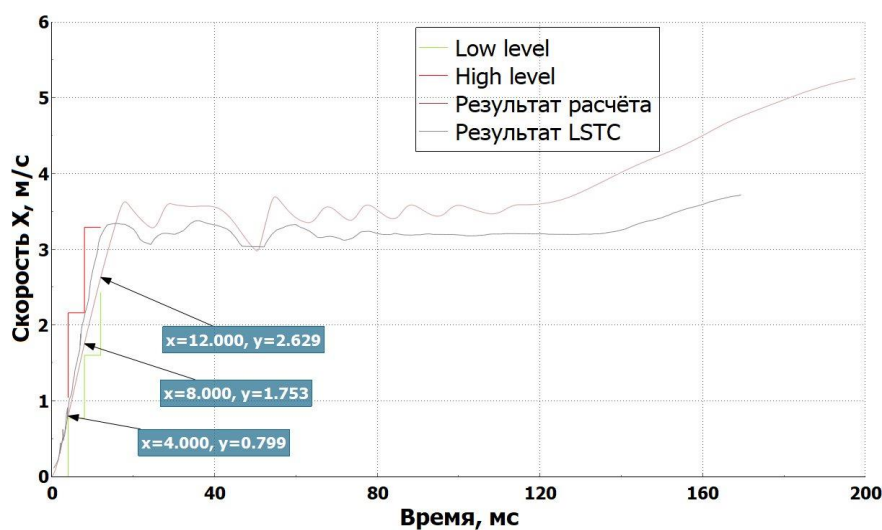


Рис. 17. Скорость маятника

Fig. 17. Pendulum speed

Таблица 3.

Сравнение расчетных значений скорости с калибровочными диапазонами

Table 3.

Comparison of calculated speed values with calibration ranges

Сравнение расчетных значений скорости с калибровочными диапазонами Переменная	Целевой диапазон	Результат LSTM	Расчетное значение
Значение скорости в 4 мс, м/с	0,77-1,04	0,870	0,799
Значение скорости в 8 мс, м/с	1,6-1,9	2,087	1,753
Значение скорости в 12 мс, м/с	2,43-3,29	3,130	2,629

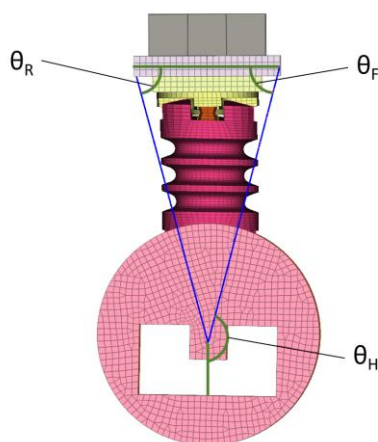


Рис. 18. Углы, измеряемые по КЭМ

Fig. 18. Angles measured by FEM

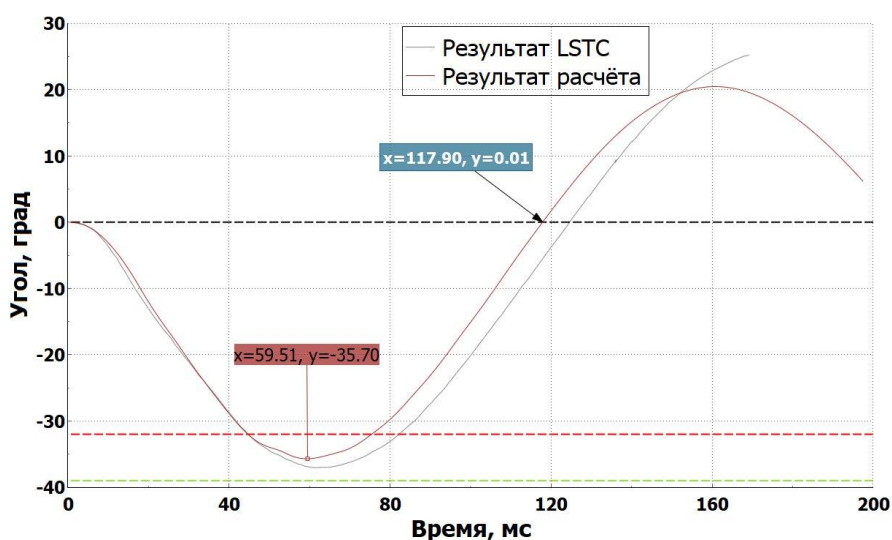


Рис. 19. Угол закручивания переднего потенциометра

Fig. 19. Front potentiometer twist angle

Далее измеряются углы поворота шеи (рис. 18). На графики выводятся изменения значения углов поворота, т.е. начало графика перемещается точку [0, 0]. На рис. 19 представлен график изменения угла переднего потенциометра θ_F . Максимальный угол закручивания составляет 35,7°, время от максимального значения угла до 0 составляет 58,4 мс, что соответствует калибровочному диапазону. На рис. 20 представлен график изменения угла заднего потенциометра θ_R . Максимальный угол закручивания составляет 31,8°, время от максимального значения угла до 0 равно 57 мс, что также соответствует калибровочному диапазону.

В расчетах фиксируются не абсолютные значения углов, а их приращения относительно начального положения. На рис. 21 представлен график угла поворота головы относительно маятника. Максимальный угол поворота головы составляет 54,49°, время от максимального значения угла до 0 составляет 55,73 мс. Значение времени затухания не соответствует калибровочному диапазону. Значение момента в затылочном мышечке вычисляется по формуле (2):

$$M_{Ocx} = M_X + (F_y) \times (0,0195 \text{ м}), \quad (2)$$

где M_X – момент, направленный относительно сагиттальной оси головы;

F_y – сила, направленная по фронтальной оси головы.

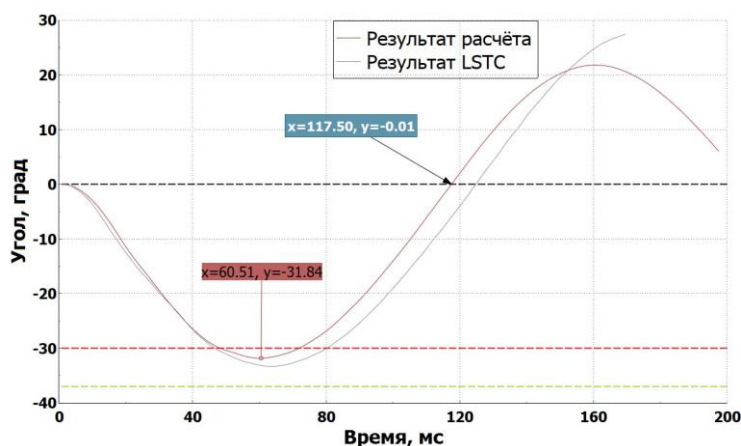


Рис. 20. Угол закручивания заднего потенциометра

Fig. 20. Rear potentiometer twist angle

Угол между головой и маятником β вычисляется по формуле (1):

$$\beta = \theta_F + \theta_H. \quad (1)$$

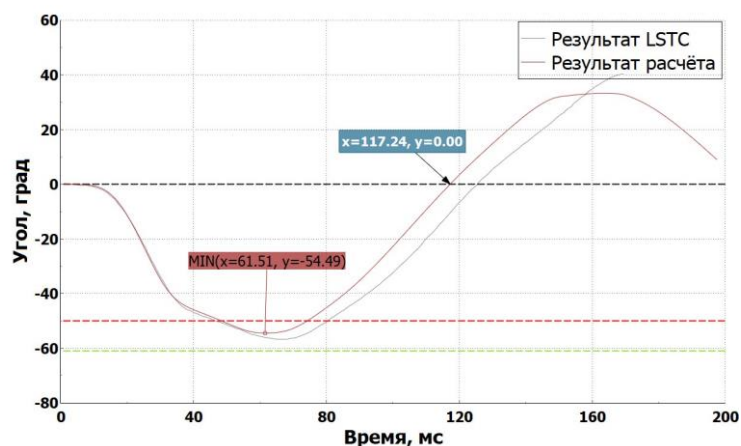


Рис. 21. Угол поворота головы относительно маятника

Fig. 21. The angle of rotation of the head relative to the pendulum

Значения момента M_x и силы F_y выгружаются из датчика момента. Перед вычислением момента в затылочном мышечке данные фильтруются по CFC600. На рис. 224 представлен график момента в затылочном мышечке. Необходимо отметить, что данные LSTC отфильтрованы более грубо.

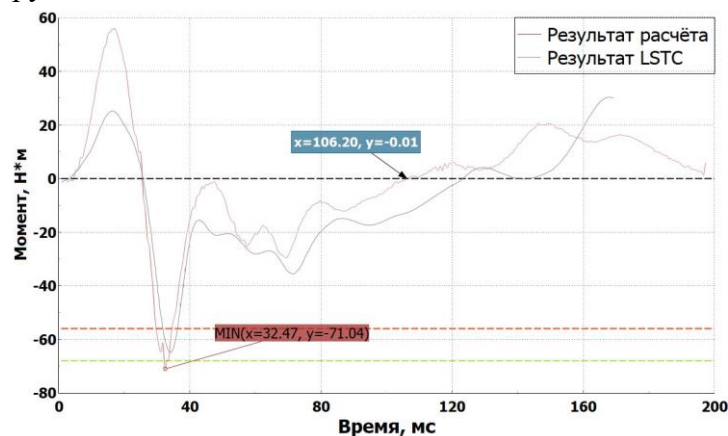


Рис. 22. Момент в затылочном мышечке

Fig. 22. Moment in the occipital condyle

Максимальный момент составляет 51,04 Н·м, время от максимального значения момента до 0 составляет 73,73 мс. Значение максимального момента в затылочном мышцелке не соответствует калибровочному диапазону. В табл. 4 представлены результаты моделирования испытания шеи манекена.

Таблица 4.
Результат моделирования испытания шеи манекена

Table 4.
The result of the dummy neck test simulation

Переменная	Целевой диапазон	Результат LSTC	Расчетное значение
Максимальный угол между головой и маятником β , град	50-61	56,72	54,49
Время затухания от β до 0 градусов, мс	58-72	58,36	55,73
Максимальный момент в затылочном мышцелке $M_{ОСх}$, Н·м	55-68	65,54	71,04
Время затухания от максимального момента до 0 Н·м, мс	71-87	89,60	73,73
Максимальный угол закручивания переднего потенциометра, град	32-39	37,07	35,7
Время максимального угла закручивания переднего потенциометра θ_F , мс	56-68	63,00	58,4
Максимальный угол закручивания заднего потенциометра, град	30-37	33,29	31,84
Время максимального угла закручивания заднего потенциометра θ_R , мс	56-68	64	57

Как видно из результатов, КЭМ испытательного стенда соответствует калибровочным диапазонам не по всем показателям. Модель LSTC также проходит не по всем показателям, кроме того, в модели LSTC используется некорректная фильтрация, что значительно влияет на результаты.

Способы повышения сходимости

Одной из возможных причин отсутствия сходимости по всем показателям результатов моделирования с калибровочными диапазонами является характеристика сотового блока. В реальных испытаниях именно сотовый блок обеспечивает достижение требуемых значений замедления. Соответственно, его энергоемкость в конечно-элементной модели должна быть эквивалентна энергоемкости физического образца, с которым обеспечивается соответствие калибровочным требованиям.

В SAE J2856-2022 указаны размеры блока, а также его плотность (28,8 кг/м³). В данном случае, как было сказано ранее, в качестве сотового блока используется часть деформируемого барьера плотностью 51,2 кг/м³. Таким образом, следующим этапом рекомендуется проведение валидации модели сотового блока с результатами испытаний реального образца, а также повторное моделирование испытания шеи.

Анализ графика поворота головы относительно маятника показывает, что время затухания от максимального значения угла до нуля меньше, чем требуется по калибровочному диапазону, что свидетельствует об избыточной жесткости шеи. Для достижения соответствия результатам калибровочного испытания необходимо снижение жесткости шеи путем уменьшения жесткости материала. Это может быть реализовано путем уменьшения жесткости материала.

Заключение

В статье описана разработка КЭМ шеи манекена WorldSID и ее последующая валидация с использованием калибровочных диапазонов согласно стандарту ISO 15830. Для выполнения нагружения шеи была разработана КЭМ маятникового стенда, которая также валидирована по коридору замедления, регламентированному тем же нормативным документом. Полученные результаты показали соответствие большинству калибровочных критериев, за исключением значения максимального момента и времени затухания угла поворота головы. Это свидетельствует об избыточной жесткости шеи и необходимости дальнейшей валидации модели до достижения сходимости по всем контрольным показателям. Также выявлено, что используемый для калибровки стенда сотовый блок обладает завышенной плотностью по сравнению с регламентированным значением, что может оказывать влияние на сходимость результатов моделирования с физическими испытаниями. Для повышения точности моделирования предлагается уточнение характеристик сотового блока, а также возможная модификация конструкции шеи.

На примере модели шеи установлено, что КЭМ манекена из свободного доступа не позволяет обеспечить необходимой точности расчетов, поскольку требует валидации как составных частей, так и манекена в сборе. В связи с этим, проведенный анализ подтверждает актуальность разработки и валидации конечно-элементных моделей манекенов, а также необходимость дальнейших исследований в этом направлении. После валидации всех остальных компонентов манекена их можно объединить в единую модель, пригодную для расчетов пассивной безопасности.

Библиографический список

1. World vehicles in use [Электронный ресурс] // International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). – URL: <https://www.oica.net> (дата обращения: 02.06.2025).
2. Global status report on road safety 2023: country and territory profiles. – Geneva : World Health Organization, 2024. – Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. – 389 p.
3. **Жителев, Д.А.** Обоснование необходимости разработки методики создания конечно-элементных моделей манекенов для проведения виртуальных испытаний автомобилей на фронтальные и боковые удары / Д.А. Жителев, Д.Ю. Солопов // Труды НАМИ. – 2024 – № 2. – С. 78-88. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2024-2-78-88>
4. ISO 15830-2:2022 *Дорожные транспортные средства – Спецификации конструкции и характеристик манекена бокового удара WorldSID 50-го перцентиля (мужчина). Часть 2: Механическая подсистема.* Второе издание = Road vehicles – Design and performance specifications for the WorldSID 50th percentile male side impact dummy. Part 2: Mechanical subsystem. Second edition. – 2022-06. – 22 с.
5. SAE J2856_202211: Руководство пользователя для манекена Hybrid III 50-го перцентиля (мужчина)* = User's Manual for the 50th Percentile Male Hybrid III Dummy. – Warrendale, PA : SAE International, 2022. – 72 с. – DOI: 10.4271/J2856_202211.
6. Dummy Models Overview and Downloads [Электронный ресурс] / Ansys Inc. – URL: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/> (дата обращения: 16.04.2025). – <Текст: электронный>.
7. **Setiawan, R.** Crashworthiness Design for an Electric City Car against Side Pole Impact / R. Setiawan, M. Salim // Journal of Engineering and Technological Sciences. – 2017. – Vol. 49, no. 5. – P. 587-603. – DOI: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.5.3.
8. LSTC Barrier Models [Электронный ресурс] / Ansys Inc. – URL: <https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/> (дата обращения: 22.04.2025).
9. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume I [Электронный ресурс] / Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. – Version R13. – 2021. – URL: https://www.dynasupport.com/manuals/ls-dyna-manuals/ls-dyna_manual_volume_i_r13.pdf (дата обращения: 17.04.2025).

10. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume II [Электронный ресурс] / Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. – Version R13. – 2021. – URL: https://www.dynasupport.com/manuals/lstc-dyna-manuals/lstc-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf (дата обращения: 22.04.2025).

References

1. International Organization of Motor Vehicle Manufacturers (OICA). n.d. “World Vehicles in Use”. Accessed June 15, 2024. <https://www.oica.net>.
2. World Health Organization. 2024. Global Status Report on Road Safety 2023: Country and Territory Profiles. Geneva: World Health Organization. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
3. Zhitelev D.A. and Solopov D.Yu. 2024. “Obosnovanie neobkhodimosti razrabotki metodiki sozdaniia konechno-elementnykh modelei manekenov dlia provedeniia virtual'nykh ispytaniy avtomobilei na frontal'nye i boko-vye udary” [Substantiation of the Need for Developing a Methodology for Creating Finite Element Dummy Models for Virtual Testing of Vehicles in Frontal and Side Impacts]. *Trudy NAMI* [Proceedings of NAMI], no. 2: 78-88. <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2024-2-78-88>.
4. International Organization for Standardization (ISO). 2022. ISO 15830-2:2022. Road Vehicles – Design and Performance Specifications for the WorldSID 50th Percentile Male Side Impact Dummy – Part 2: Mechanical Subsystem. 2nd ed. Geneva: ISO.
5. SAE International. 2022. SAE J2856_202211: User's Manual for the 50th Percentile Male Hybrid III Dummy. Warrendale, PA: SAE International. https://doi.org/10.4271/J2856_202211.
6. Ansys Inc. n.d. “Dummy Models Overview and Downloads”. Accessed April 16, 2025. <https://lsdyna.ansys.com/lstc-dummy-models-overview/>.
7. Setiawan, R. and Salim M. 2017. “Crashworthiness Design for an Electric City Car against Side Pole Impact”. *Journal of Engineering and Technological Sciences* 49 (5): 587-603. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.5.3>.
8. Ansys Inc. n.d. “LSTC Barrier Models”. Accessed April 22, 2025. <https://lsdyna.ansys.com/lstc-barrier-models/>.
9. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. 2021. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume I. Version R13. Livermore, CA: LST. Accessed April 17, 2025. https://www.dynasupport.com/manuals/lstc-dyna-manuals/lstc-dyna_manual_volume_i_r13.pdf.
10. Livermore Software Technology (LST), an ANSYS Company. 2021. LS-DYNA® Keyword User's Manual. Volume II. Version R13. Livermore, CA: LST. Accessed April 22, 2025. https://www.dynasupport.com/manuals/lstc-dyna-manuals/lstc-dyna_manual_volume_ii_r13.pdf.

**Дата поступления
в редакцию: 02.06.2025**

**Дата принятия
к публикации: 25.10.2025**