

УДК 623.45:623.4.015.4

## Анализ высокоскоростного удара эластичного компактного элемента по модели антропоморфного манекена THUMS

Кудрявский Александр Эдуардович

ae.kudryavskiy@gmail.com

Левин Денис Петрович

dlevin@bmstu.ru

SPIN-код: 3571-3030

Петюков Андрей Вячеславович

petyukov\_a@bmstu.ru

SPIN-код: 7641-8495

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Рассмотрена модель антропоморфного манекена THUMS, и проведен анализ взаимодействия с ней эластичного компактного элемента высокой твердости в форме шара. Проведена оценка характера потенциальных травм при действии резинового боеприпаса на скорости взаимодействия 121,5 м/с. Определены характерные получаемые травмы при попадании в зубы, лицо, глаза, а также получены значения вязкостного критерия VC и критерия травмы головы HIC. Обнаружено, что при взаимодействии ударника с манекеном полученная величина VC указывает на >25 % вероятность травмы степени тяжести AIS >2. Попадание в затылок может привести к травме с вероятностью 10 % по AIS = 1; 30 % по AIS = 2 и 1,4 % по AIS > 3, а в боковую часть головы — с вероятностью 8,7 % по AIS = 1; 2,9 % по AIS = 2 и 1,38 % по AIS > 3. Кинетическая энергия шара достаточна для разрыва глазного яблока и перелома черепа, при этом прогиб черепа превышает допустимое значение. При попадании в зубы их целостность не нарушается, но возможен вывих зуба, ушибы, гематомы и отек мягких тканей лица.

**Ключевые слова:** кривая «инженерное напряжение-инженерная деформация» эластомеров, оружие нелетального действия, численное моделирование, кинетический элемент, резина, ударник, шар

## Analysis of the compact elastic element high-speed impact to THUMS anthropomorphic dummy model

Kudryavskiy Aleksandr Eduardovich

ae.kudryavskiy@gmail.com

Levin Denis Petrovich

dlevin@bmstu.ru

SPIN-code: 3571-3030

Petyukov Andrey Vyacheslavovich

petyukov\_a@bmstu.ru

SPIN-code: 7641-8495

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** The model of the anthropomorphic dummy THUMS is considered, and the high-speed interaction of this model with a high-hardness compact elastic element in the form of a ball is analyzed. The nature of potential injuries caused by a rubber projectile at a speed of 121.5 m/s is evaluated, and the typical injuries caused by impact with teeth, face, and eyes are determined. The values of the viscous criterion VC and the head injury criterion HIC are also obtained. It was found that when the impactor interacts with the dummy, the

*resulting VC value indicates a >25 % probability of AIS > 2 injury. A hit to the back of the head can cause injury with a probability of 10 % for AIS = 1; 30 % for AIS = 2 and 0,014 for AIS > 3, and a hit to the side of the head can cause injury with a probability of 8,7 % for AIS = 1; 2,9 % for AIS = 2 and 1,38 for AIS > 3. The kinetic energy of the ball is sufficient to cause eye rupture and skull fracture, with the skull bending beyond the permissible value. If it hits your teeth, it won't damage them, but it can cause tooth dislocation, bruises, hematomas, and swelling of the soft tissues in your face.*

**Keywords:** *engineering stress-engineering strain curve of elastomers, non-lethal weapons, numerical modeling, kinetic element, rubber, impactor, ball*

**Введение.** Действие непроникающих кинетических элементов (КЭ) основано на использовании кинетической энергии удара для оказания болевого воздействия без проникания через кожные покровы. Основной проблемой при проектировании таких снарядов является выбор соответствующих материалов и отбор конструкции для получения при ударе по цели травмы определенной степени тяжести [1–3]. Результаты испытаний опытных образцов на лабораторных животных, безусловно, позволяют сделать общий вывод о травмирующем действии, однако это достаточно длительный и дорогостоящий процесс. Кроме того, получить в рамках таких испытаний характеристики соударения, необходимые для определения общепринятых критериев травмы, например вязкостного критерия (Viscous Criterion, VC) [4] или критерия для оценки травмы головы (НІС) [5], весьма сложно и требует специфического оборудования.

Проверка средств поражения летального и нелетального оружия на антропоморфной модели THUMS в среде LS-DYNA может представлять любопытный и важный инструмент в руках проектировщика, позволяющий получать приближенные к реальности данные о воздействии средства поражения на человеческий организм.

Цель данной работы — оценка характера потенциальных травм при действии эластичного компактного элемента высокой твердости в форме шара на скорости взаимодействия 121,5 м/с и определение характерных получаемых травм при попадании в зубы, лицо, глаза, а также получение значений вязкостного критерия VC и критерия травмы головы НІС.

**Материалы и методы. Описание модели манекена THUMS.** Total Human Model for Safety (THUMS) — это конечно-элементная модель человека, которая направлена на имитацию кинематики человеческого тела и реакций на травмы при автомобильных авариях. Существуют версии и вариации THUMS: AM50 — модель взрослого мужчины среднего размера, которая имеет рост 175 см и вес 77 кг; AF05 — модель женщины небольшого размера; AM95 — модель мужчины большого размера [6] (рис. 1, а).

Информация о геометрии манекена получена с помощью КТ-сканирования высокого разрешения. THUMS включает в себя все части скелета и основные мягкие ткани. Общая модель всего тела была создана путем совмещения всех компонентных моделей (голова и мозг, шея и т. д.). Вся модель разделена на несколько областей в соответствии с их пространственным расположением на модели (рис. 1, б).

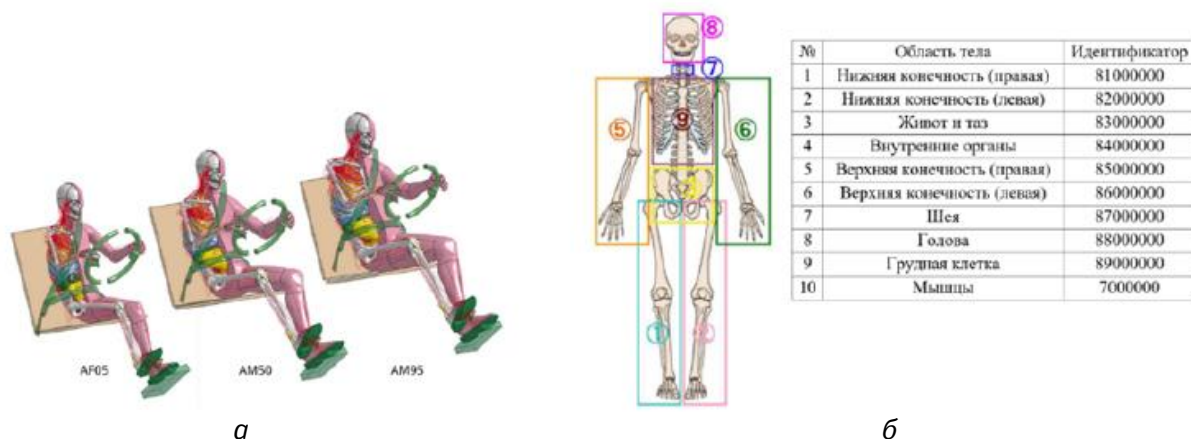


Рис. 1. а — полный вид семейства THUMS; б — идентификаторы областей тела человека в THUMS

**Описание кинетического элемента.** Численная модель материала ударника высокой твердости (80 А по Шору, марка резины 7В-14-1НТА, 20 г.) протестирована и проверена на основании методики расчетно-экспериментальной оценки параметров деформирования резиновых ударников в диапазоне скоростей  $\approx 10\text{--}120$  м/с, характерных для нелетальных боеприпасов и средств кинетического воздействия.

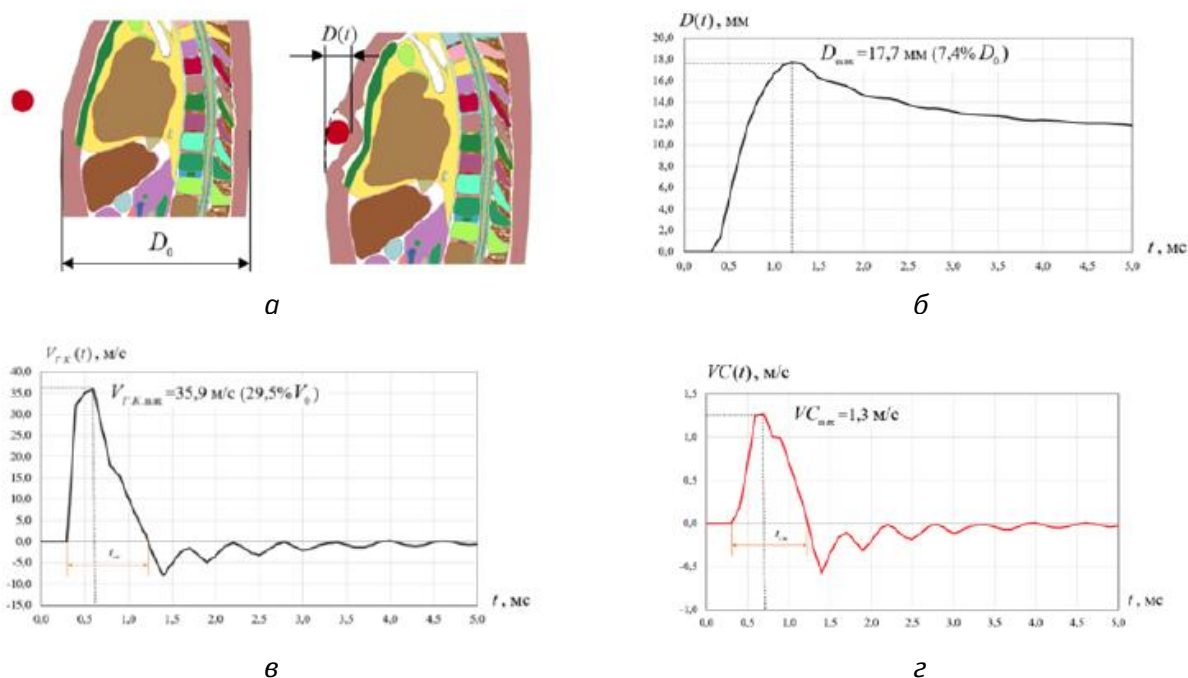
**Результаты. Получение вязкостного критерия  $VC$ .** Вязкостный критерий предназначен для определения серьезности повреждений мягких тканей и кардиореспираторной дисфункции, вызванной тупым ударом, и учитывает динамику перемещения стенки грудной клетки  $D(t)$  и скорость ее перемещения в процессе взаимодействия с ударником  $V_{ГК}(t)$ . Результаты при воздействии ударника с начальной скоростью  $V_0 = 121,5$  м/с представлены на рис. 2. Путем перемножения графиков на рис. 2, б и в можно получить зависимость вязкостного критерия от времени  $VC(t)$  (рис. 2, г).

**Получение критерия травмы головы (НИС).** Для оценки травмы головы применяется критерий НИС (англ. Head Injury Criterion):  $НИС =$

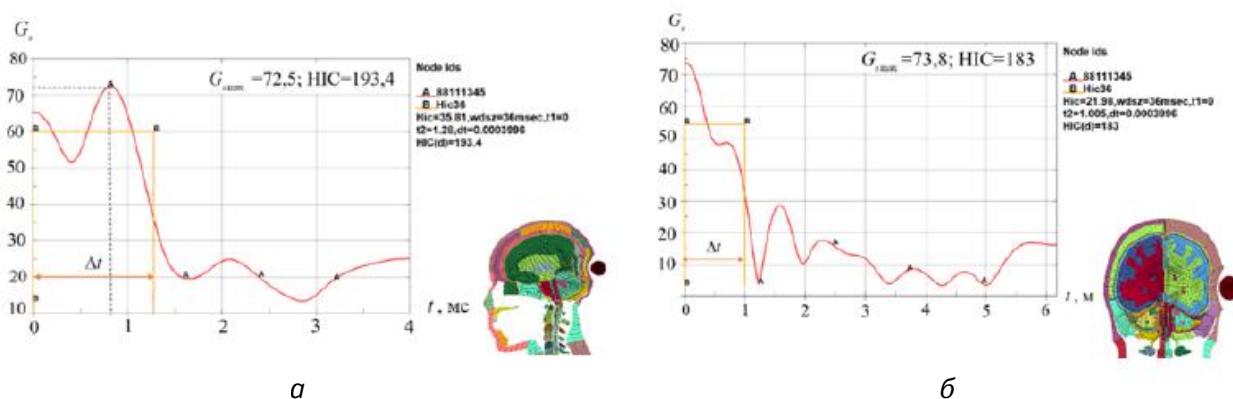
$$= \max \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1),$$
 где  $t_1$  и  $t_2$  — произвольные моменты времени в течение импульса ускорения;  $a(t)$  — функция ускорения. Результаты при воздействии ударника с начальной скоростью  $V_0 = 121,5$  м/с представлены на рис. 3.

**Определение травмы для глаза, скуловой части, зубов.** Критериев травмы для этих частей тела человека, аналогичных  $VC$  или  $НИС$  не существует, поэтому результат можно оценить только качественно, однако известны значения параметров действия кинетического элемента и соответствующие им повреждения при взаимодействии с различными частями тела человека (в случае незащищенной живой силы) [7] (рис. 4). При попадании в глаз с большой вероятностью произойдет разрыв глазного яблока, а исходя из действия КЭ на модель манекена происходит резкий поворот глаза вокруг

его вертикальной оси на  $27^\circ$  за 1 мс (рис. 4, а), вследствие чего возможны разрыв или растяжение мышц, повреждение нервов, кровоизлияние, травма хрусталика, повреждение глазницы. При попадании в другие области лица опасных для жизни травм не возникает. При полете к зубам (рис. 4, б) максимальное напряжение в теле зуба достигает  $\approx 82$  МПа, что недостаточно для разрушения дентина ( $432 \pm 16$  МПа) или эмали ( $363 \pm 8$  МПа). Средняя максимальная ударная нагрузка, которую может выдержать здоровый зуб взрослого человека, составляет около 1000–1500 Н, поэтому данный ударник не может разрушить зубы. Целостность зубов не нарушается, однако смещение фронтальных верхних зубов на  $16^\circ$  и нижних на  $13^\circ$  за 0,1 мс, вероятно, приведет к вывиху зуба, ушибам, гематомам и отекам мягких тканей лица.



**Рис. 2.** а — прогиб грудной клетки; б — график перемещения передней стенки грудной клетки от времени; в — график скорости деформации грудной клетки от времени; г — график зависимости величины вязкостного критерия от времени



**Рис. 3.** НИС при ударе в область:  
а — затылочную; б — боковую

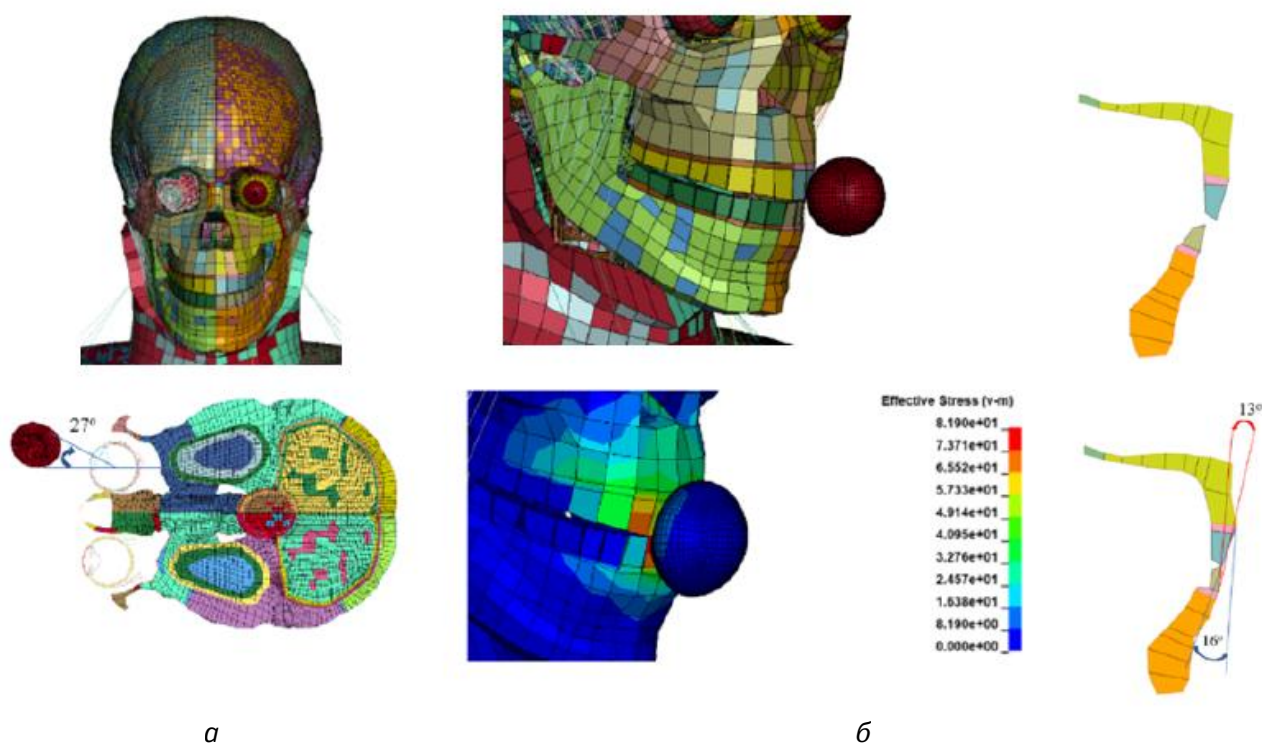


Рис. 4. Воздействие:

а — глаз; б — зубы

**Обсуждение полученных результатов.** Рассмотрены составные части модели антропоморфного манекена THUMS, и показан результат воздействия эластичного компактного элемента высокой твердости в форме шара на скорости 121,5 м/с. При попадании в область грудной клетки в данных условиях длительность фазы сжатия грудной клетки составляет порядка  $t_{сж} = 1$  мс, и в момент времени  $t = 1,2$  мс (рис. 2, а) перемещение передней стенки грудной клетки достигает своего максимума и равно примерно 7,4 % от изначальной длины  $D_0 = 240$  мм (рис. 2, б), а максимальная скорость деформации грудной клетки 35,9 м/с (29,5 % от  $V_0$ ) (рис. 2, в). Полученное максимальное значение графика на рис. 2, в составляет  $V_{C_{max}} = 1,3$  м/с. Исходя из экспериментальных исследований и полученного с помощью логистического-регрессионного анализа графика, представленного в работе [8], можно установить, что такое значение VC соответствует >25 %-ной вероятности возникновения травмы степени тяжести больше 2 по шкале AIS, но вероятность получения тяжелого повреждения легких (контузии) мала и составляет  $\approx 5$  %. При попадании в затылок возможна травма с вероятностью 10 % по AIS = 1, 3 % по AIS = 2 и 1,4 % по AIS > 3 по критерию НИС (если судить по кинетической энергии шара, то вероятно будет перелом черепа, а прогиб превышает допустимое значение и составляет 14 мм), а в затылок — 8,7 % по AIS = 1, 2,9 % по AIS = 2 и 1,38 % по AIS > 3 по критерию НИС (если судить по кинетической энергии шара, то также будет перелом черепа, прогиб превышает допустимое

значение и составляет 12 мм). При попадании в зубы их целостность не нарушается, но возможен вывих зуба, ушибы, гематомы и отек мягких тканей лица.

**Заключение.** Манекен THUMS, разработанный с целью точного воспроизведения структуры человеческого тела, позволяет исследовать последствия воздействия средств поражения на различные внешние части манекена и внутренние органы, что делает его весьма удобным инструментом для разработки новых нелетальных систем. Важно подчеркнуть, что использование таких высокотехнологичных моделей может поспособствовать не только улучшению оружейных систем, но и разработке средств защиты от них.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Gonsales A.A.V., Levin D.P., Petyukov A.V., Arcivenko M.E. Modeling of the kinetic element interaction with biological object. *Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety*, 2022, vol. 6, no. 1. <https://doi.org/10.1007/s41314-022-00042-3>
- [2] Selivanov V.V., Levin D.P., Petukov A.V. et al. Modeling of dynamic interaction of a fabric airbag with an anthropometric dummy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1191, no. 1, art. no. 012003. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1191/1/012003>
- [3] Гонсалес А.А.В., Левин Д.П., Петюков А.В. Технические средства нелетального воздействия на основе двойных технологий. *Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму*, 2020, № 7–8 (145–146), с. 95–102.
- [4] Bir C.A. *The Evaluation of Blunt Ballistic Impacts of the Thorax*. Detroit, Wayne State University, 2000, 215 p.
- [5] Gao D., Wampler C.W. Head injury criterion. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2009, vol. 16, no. 4, pp. 91–102. <https://doi.org/10.1109/MRA.2009.934824>
- [6] *Total Human Model for Safety (THUMS) AM50 Occupant Model, Version 6*. URL: <https://www.toyota.co.jp/thums/> (accessed 08.02.2025).
- [7] Селиванов В.В., Левин Д.П. *Оружие нелетального действия*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
- [8] Bir C.A. The Evaluation of Blunt Ballistic Impacts of the Thorax. *Journal of Biomechanics*, 2000, vol. 33, no. 7, pp. 865–870. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(00\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(00)00027-5)