

УДК 51-74

В. Н. Гаранин¹, А. Э. Юницкий², С. В. Артюшевский², В. А. Овсянко², С. А. Пронкевич³¹ Белорусский государственный технологический университет² ЗАО «Струнные технологии»³ Белорусский государственный университет**РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ
НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА**

В представленной работе уделено внимание проблеме повышения эффективности моделирования процессов разрушения различных неоднородных материалов. В частности, основной акцент сделан на изучение процесса разрушения бетона. Представлены различные методики моделирования взаимодействия материалов с описанием их достоинств и недостатков. За основу в данной работе выбран метод Лагранжа, который, по мнению авторов, является наиболее подходящим. Использование предлагаемых в работе специальных компьютерных моделей в пакете инженерного анализа ANSYS/LS-DYNA позволяет решать с высокой степенью точности задачи прогнозирования процессов высокоскоростного разрушения сложных объектов. Использование метода Лагранжа позволяет снизить требования к вычислительному оборудованию и повысить точность расчетов за счет использования специального моделирования неоднородности среды. С целью подтверждения достоверности получаемых данных компьютерных моделей были проведены испытания на специальном полигоне, где бетонные образцы подвергались высокоскоростному воздействию со стороны снарядов (пуля). Проведенное исследование показало, что результаты численных экспериментов пулестойкости бетонных образцов с явным моделированием гранитного наполнителя приближены к результатам натурных испытаний, что подтверждает релевантность разработанных моделей и методики расчета. Полученные результаты позволяют получать достоверные результаты и при моделировании разрушения других неоднородных материалов, таких как древесина с различными дефектами.

Ключевые слова: разрушение, скорость, энергия, пуля, бетон, метод конечных элементов.

Для цитирования: Гаранин В. Н., Юницкий А. Э., Артюшевский С. В., Овсянко В. А., Пронкевич С. А. Разработка компьютерной модели разрушения неоднородного материала // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. 2022. № 1 (254). С. 28–37.

V. N. Garanin¹, A. E. Unitsky², S. V. Artyushevsky², V. A. Ovsyanko², S. A. Pronkevich³¹ Belarusian State Technological University² Unitsky String Technologies, Inc.³ Belarusian State University**DEVELOPMENT OF A COMPUTER MODEL
OF DESTRUCTION HETEROGENEOUS MATERIAL**

In the presented work, attention is paid to the problem of increasing the efficiency of modeling the destruction processes of various inhomogeneous materials. In particular, the main emphasis is placed on the study of the process of destruction of concrete. Various methods for modeling the interaction of materials with a description of their advantages and disadvantages are presented. For the basis of this work, the Lagrange method was chosen, which, according to the author, is the most appropriate. The use of special computer models proposed in the work in the ANSYS/LS-DYNA engineering analysis package makes it possible to solve with a high degree of accuracy the problems of predicting the processes of high-speed destruction of complex objects. The use of the Lagrange method makes it possible to reduce the requirements for computing equipment and improve the accuracy of calculations through the use of special modeling of the inhomogeneity of the medium. In order to confirm the reliability of the obtained data of computer models, tests were carried out at a special test site, where concrete samples were subjected to high-speed impact from projectiles (bullets). The study showed that the results of numerical experiments on the bullet resistance of concrete samples with explicit modeling of granite filler are close to the results of full-scale tests, which confirms the relevance of the developed models and calculation methods. The results obtained make it possible to obtain reliable results when modeling the destruction of other inhomogeneous materials, such as wood with various defects.

Key words: destruction, speed, energy, bullet, concrete, finite element method.

For citation: Garanin V. N., Unitsky A. E., Artyushevsky S. V., Ovsyanko V. A., Pronkevich S. A. Development of a computer model of destruction heterogeneous material. *Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics*, 2022, no. 1 (254), pp. 28–37 (In Russian).

Введение. Процесс высокоскоростного разрушения неоднородных материалов рассматривается как с точки зрения снижения энергоемкости разрушения (при изучении процесса резания), так и с точки зрения защиты различных конструкций от разрушения (например, при создании материалов, способных выдерживать нагрузки). Данное утверждение сопоставимо с задачами, стоящими перед архитектором при проектировании здания, которое должно выдерживать различные нагрузки в процессе эксплуатации и разрушиться от воздействия нагрузок при его утилизации. Общее, что объединяет данные направления, – это использование специальных компьютерных моделей, позволяющих спрогнозировать поведение разрушающегося и разрушаемого тел при их взаимодействии еще на стадии проектирования.

Разработка моделей, позволяющих в равной степени спрогнозировать внедрение с высокой скоростью (более 50 м/с) твердого тела в неоднородный объект, является актуальной задачей для множества технологических процессов (резание древесины, разрушение бетона, краш-тесты подвижных конструкций, бронезащита и другое). Кроме того, использование пуля, как разрушающего объекта, на сегодняшний день пока еще находит распространение среди различных групп людей, ставящих в том числе перед собой и недобрые цели (примером служат терроризм и вандализм).

При моделировании разрушения неоднородных материалов возникают трудности в получении достоверных данных, связанные с использованием усредненных значений их свойств. К неоднородным материалам на локальном уровне можно отнести древесину из-за наличия волокон, сучков, гнили и прочих, бетоны из-за наличия различных наполнителей и другие материалы.

Обратим внимание на проблему, существующую при обработке древесины, произрастающей на стрелковых полигонах: деревообработчики сталкиваются с большим количеством пуль, находящихся внутри ее, которые «собираются» на протяжении роста растения (рис. 1).

Как видно из рис. 1, пули (свинцовые) не были подвергнуты сильной деформации со стороны относительно мягкой древесины. Можно предположить, что внедрение пули в более твердый материал, например бетон, будет иметь иной характер деформации, поскольку пуля находится во время движения в материале под действием более высокого сопротивления, зависящего от плотности сред разрушения. Пуля двигается в материале по траектории, зависящей от неоднородности среды, расходуя свою кинетическую энергию на создание различных деформаций, являющихся причиной возникновения разрушающих напряжений, и позволяет тем самым прокладывать себе путь.



Рис. 1. Пули, извлеченные из древесины

В отличие от вышеуказанного механизма свободного внедрения, когда нет постоянного подвода кинетической энергии для разрушения материала, воздействие с постоянной скоростью острого твердого тела на анизотропный материал (например, при осуществлении резания материала) может иметь иной характер, что следует учитывать при моделировании процесса взаимодействия материалов. Например, при моделировании высокоскоростного разрушения древесины следует учитывать тот факт, что распространение волн напряжений сжатия осуществляется вдоль волокон с более высокой скоростью, чем поперек волокон из-за свойств анизотропии данного материала [1, 2]. Что касается бетона, то можно предположить, с учетом более высокой скорости звука в нем: волны будут направлены уже вдоль границ наполнителя, а это не позволяет использовать для него модели, разработанные для древесины.

Чем выше скорость взаимодействия, тем больше значения напряжений сжатия в зоне разрушения материала. Повысить скорость взаимодействия при разрушении материалов можно путем дискретного подвода энергии к внедряемому телу (инструменту) с частотой, равной одной из частот собственных колебаний объекта разрушения, что используется в перфораторах при разрушении бетона в строительстве.

Анализируя различные подходы к решению задач разрушения неоднородных материалов математическими методами [3–5], можно утверждать, что моделирование динамического разрушения строительных конструкций из таких материалов относится к нелинейным задачам со сложными контактными взаимодействиями, которые в результате приводят к возникновению больших деформаций и разрушению материалов взаимодействия.

Основными методами, которые могут применяться для решения такого рода задач с использованием пакета конечно-элементного анализа ANSYS/LS-DYNA, согласно [6], являются:

- метод Эйлера;
- произвольная постановка Лагранжа – Эйлера (ALE);

- метод дискретных элементов (DEM);
- метод Галеркина (EFG);
- метод сглаженных частиц Галеркина (SPG);
- сеточный метод Лагранжа;
- бессеточный метод сглаженных частиц (SPH).

Метод Эйлера и смешанная постановка Лагранжа – Эйлера в основном применяются для анализа поведения материалов при взаимодействии с жидкостями или газом и позволяют моделировать большие деформации. Однако эти методы имеют существенный недостаток, так как не позволяют удалять разрушившийся материал в процессе счета, что может значительно снизить точность расчетов [6].

Метод дискретных элементов основан на применении законов Ньютона и контактной механике. Данный метод широко используется в геомеханике для моделирования механического поведения твердых частиц сыпучих сред. Однако рассматриваемый метод не позволяет в пределах элементарного объема задать различные законы взаимодействия между частицами и определяющие уравнения деформирования среды. То есть этот метод не дает возможности описывать поведение конструкций из неоднородных сред [6].

Метод Галеркина является высокоточным методом решения задач со сверхбольшими деформациями. Он предъявляет повышенные требования к объему оперативной памяти и процессору ЭВМ, но за счет большой скорости сходимости решает сложные задачи быстрее классических методов. Однако, как и метод ALE, метод EFG не подходит для анализа разрушения материалов.

Метод сглаженных частиц Галеркина является относительно новым и перспективным. Он схож с методом SPH и даже имеет ряд преимуществ по сравнению с последним. Однако метод SPG до настоящего времени является малоизученным среди широкого круга пользователей и в открытом доступе практически полностью отсутствуют работы по моделированию разрушений с его использованием.

На данный момент, согласно проведенному анализу работ [7–13] по моделированию разрушения образцов конструкций из неоднородных материалов высокоскоростным нагружением, наиболее популярными остаются два последних: сеточный метод Лагранжа и бессеточный метод сглаженных частиц.

Сеточный метод Лагранжа наиболее быстрый и точный метод, при котором моделирование неоднородных конструкций выполняется сплошной средой, а разрушение моделируется удалением элементов, у которых превышен один из критериев прочности. При значительных пластических деформациях используется разрушение по деформациям, а при хрупком разрушении – по главным напряжениям.

Бессеточный метод сглаженных частиц является более требовательным к машинным ресурсам и имеет меньшую стабильность при сходимости. Этот метод позволяет моделировать практически любые деформации, при этом сохраняются преимущества Лагранжевого подхода.

Основная часть. Большинство исследований в области моделирования разрушения неоднородных материалов (бетонных образцов с наполнителем) основаны на подходе, при котором испытуемый образец конструкции моделируется сплошной средой или объемом частиц (для бессеточного метода) без учета локальных неоднородностей: твердые наполнители, волокна, поры и т. п. Для расчетов принимаются усредненные параметры материала, полученные при лабораторных испытаниях на одно- или трехосное сжатие. Такой подход дает достаточно точный результат при медленном статическом нагружении относительно большой конструкции. Однако при высокоскоростном динамическом нагружении происходят разрушения, для правильного отражения которых необходима локальная оценка изменений прочностных свойств материала конструкции с учетом наличия неоднородностей.

В настоящей работе выполняется моделирование разрушения образца бетона снарядом (пулей) с использованием разработанной методики с последующим сравнением результатов моделирования с натурными экспериментальными данными [14].

Для повышения точности вычислительных экспериментов при скоростном нагружении бетонных образцов с разрушением применена методика моделирования гранитного наполнителя в явном виде с непосредственным указанием физико-механических свойств гранита и контактно-взаимодействия между гранитом и бетонным раствором.

Применяемый в качестве модели разрушаемого материала бетон является неоднородным хрупким материалом, имеющим сложное нелинейное поведение при динамической нагрузке. При этом в нем отмечается существенная разница в поведении при растяжении и сжатии.

Для описания нелинейного поведения бетона в условиях больших скоростей деформации и давления существует множество моделей материала. При этом критериями выбора модели являются учет скорости деформации в условиях динамического нагружения, наличие в модели механизма разрушения и минимальный набор входных параметров. Таким требованиям соответствуют модель Karagozian&Case (K&C) и модифицированная модель Джонсона – Кука в пакете ANSYS/LS-DYNA.

Рассмотрим процесс моделирования высокоскоростного разрушения неоднородного материала в пакете ANSYS/LS-DYNA в явной постановке

с использованием метода Лагранжа на примере внедрения твердого тела (пули) в бетонную преграду. Для описания поведения бетона применим модель К&С, а для описания пули – модифицированную модель Джонсона – Кука. Для анализа применим схему эксперимента по внедрению пули в бетон, которая представлена на рис. 2.

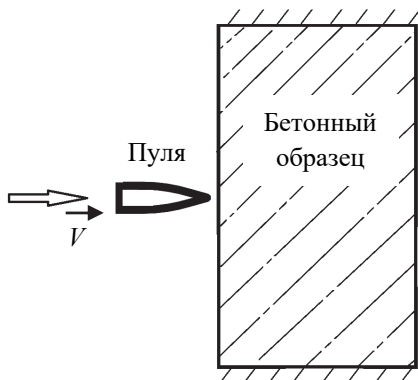


Рис. 2. Схема эксперимента

Конечно-элементная модель (КЭМ) пули показана на рис. 3, а бетонного образца с наполнителем – на рис. 4.

КЭМ пули состоит из трех частей: биметаллической оболочки 1, свинцовой рубашки 2 и стального сердечника 3 (рис. 3). Средний размер конечных элементов всех частей модели пули составляет 0,2 мм.

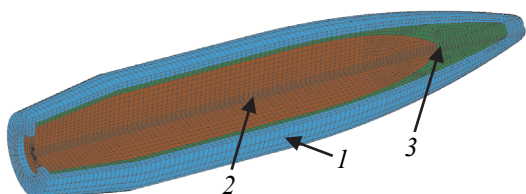


Рис. 3. Конечно-элементная модель пули

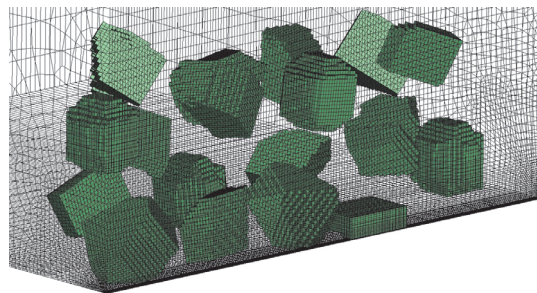


Рис. 4. Конечно-элементная модель бетонного образца с наполнителем размером 15–20 мм

Для описания поведения частей пули используется эмпирическая модель материала Джонсона – Кука, позволяющая учесть деформационное упрочнение и зависимость напряжения от скорости деформирования и температуры [6]. В данной модели динамический предел текучести σ_y , МПа, определяется по формуле

$$\sigma_y = (A + B \cdot \epsilon_p^n) \cdot \left(1 + c \cdot \ln \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0} \right) \times \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right), \quad (1)$$

где A, B – параметры прочности материала, МПа; ϵ_p – эффективная пластическая деформация, %; c, n, m – безразмерные параметры материала; $\dot{\epsilon}_0$ – относительная деформация, мм/мм; T_m – температура плавления, К; T_r – комнатная температура, К.

Подробное описание использования модели Джонсона – Кука представлено в источнике [15]. Для проведения КЭМ анализа в пакете ANSYS/LS-DYNA на рис. 5–8 приведены входные параметры моделей используемых материалов частей пули, которые взяты из вышеуказанного источника [15].

| MID | RO | G | E | PR | DTF | VP | RATEOP |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3 | 7.850e-06 | 81.800003 | 200.00000 | 0.3000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| A | B | N | C | M | TM | TR | EPSO |
| 0.2170000 | 0.5000000 | 0.2280000 | 0.0170000 | 0.9170000 | 1427.0000 | 293.00000 | 0.0010000 |
| CP | PC | SPALL | IT | D1 | D2 | D3 | D4 |
| 510.00000 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| D5 | C2/P | EROD | EFMIN | NUMINT | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0 | 1.000e-06 | 0.0 | | | |

Рис. 5. Параметры материала биметаллической оболочки пули

| EOSID | C | S1 | S2 | S3 | GAMA0 | A | E0 |
|-------|-----------|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| 3 | 4569.0000 | 1.4900000 | 0.0 | 0.0 | 2.1700001 | 0.0 | 0.0 |
| V0 | - | LCID | | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0 | | | | | |

Рис. 6. Параметры уравнения состояния биметаллической оболочки пули

| MID | RO | E | PR | BETA | XSI | CP | ALPHA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2 | 1.074e-05 | 18.000000 | 0.4200000 | 0.0 | 0.9000000 | 124.00000 | 2.900e-05 |
| E0DOT | Tr | Tm | T0 | FLAG1 | FLAG2 | | |
| 5.000e-07 | 293.00000 | 760.00000 | 293.00000 | 0.0 | 1.0000000 | | |
| A/SIGA | B/B | N/BETA0 | C/BETA1 | m/NA | | | |
| 0.0240000 | 0.3000000 | 1.0000000 | 0.1000000 | 1.0000000 | | | |
| Q1/A | C1/N | Q2/ALPHA0 | C2/ALPHA1 | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | | | |
| DC/DC | PD/WC | D1/NA | D2/NA | D3/NA | D4/NA | D5/NA | |
| 0.0 | 0.1750000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | |

Рис. 7. Параметры материала свинцовой рубашки пули

| MID | RO | E | PR | BETA | XSI | CP | ALPHA |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 20 | 7.850e-06 | 210.00000 | 0.3300000 | 0.0 | 0.9000000 | 477.0000 | 1.200e-05 |
| E0DOT | Tr | Tm | T0 | FLAG1 | FLAG2 | | |
| 5.000e-07 | 293.00000 | 1800.0000 | 293.00000 | 0.0 | 0.0 | | |
| A/SIGA | B/B | N/BETA0 | C/BETA1 | m/NA | | | |
| 1.2000000 | 50.000000 | 1.0000000 | 0.0 | 1.0000000 | | | |
| Q1/A | C1/N | Q2/ALPHA0 | C2/ALPHA1 | | | | |
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | | | | |
| DC/DC | PD/WC | D1/NA | D2/NA | D3/NA | D4/NA | D5/NA | |
| 0.0 | 0.0 | 0.0510000 | 0.0180000 | -3.0000000 | 2.000e-04 | 0.5500000 | |

Рис. 8. Параметры материала стального сердечника

Для описания нелинейного поведения бетона в условиях больших скоростей деформации и давления, как уже отмечалось выше, используем модель К&С, которая является трехинвариантной, линейной, изотропной и гипотупругопластичной и учитывает разрушения и скорость деформации [16, 17].

Модель К&С использует три параметра напряжения сдвиговой текучести, которые представлены в виде зависимостей (2)–(4).

1. Напряжение текучести поверхности модели Y_y , Па:

$$Y_y = \Delta\sigma_y = a_{oy} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y}p}. \quad (2)$$

2. Предельное напряжение текучести поверхности модели бетона Y_m , Па:

$$Y_m = \Delta\sigma_m = a_{om} + \frac{p}{a_{1m} + a_{2m}p}. \quad (3)$$

3. Остаточное напряжение текучести поверхности модели бетона Y_r , Па:

$$Y_r = \Delta r = a_{of} + \frac{p}{a_{1f} + a_{2f}p}. \quad (4)$$

где a_i – параметры напряжения, задающие прочность поверхности, Па; p – гидростатическое

давление, которое составляет одну треть от общего напряжения, Па.

Общий критерий текучести для модели К&С может быть рассчитан по формуле

$$f = J_2 - [F_f(I_1, \Theta)]^2 = 0, \quad (5)$$

где J_2 , I_1 , Θ – инварианты напряжений, Па; F_f – сдвиговое напряжение поверхности разрушения, Па.

Для описания поведения материала бетона в модели К&С необходимо указать ряд входных параметров, получаемых в ходе испытаний бетона на одно-, двух- и трехосное сжатие/растяжение.

Модель поведения бетона, согласно рекомендациям разработчика пакета ANSYS/LS-DYNA [6], применяется в совокупности с уравнением состояния TABULATED_COMPACTION, которое устанавливает соотношения между давлением p , Па, и внутренней энергией в единицах объема E , м³:

$$p = C(\epsilon_v) + \gamma T(\epsilon_v)E, \quad (6)$$

где $C(\epsilon_v)$ – давление относительно нулевой изотермы, Па; γ – показатель адиабаты; $T(\epsilon_v)$ – термодинамическая температура, определяемая объемной деформацией, К.

На рис. 9, 10 представлены входные параметры бетона, которые используются в данной работе для проведения анализа КЭМ в пакете ANSYS/LS-DYNA [6].

| | | | | | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| MID | RO | PR | | | | | |
| 1 | 2.400e-06 | 0.1900000 | | | | | |
| FT | A0 | A1 | A2 | B1 | OMEGA | A1F | |
| 0.0036340 | 0.0124200 | -0.040000 | 1.9240000 | 1.6000000 | 0.5000000 | 0.4417000 | |
| Slambda | NOUT | EDROP | RSIZE | UCF | LCRATE | LOCWIDTH | NPTS |
| 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| lambda1 | lambda2 | lambda3 | lambda4 | lambda5 | lambda6 | lambda7 | lambda8 |
| 0.0 | 8.000e-06 | 2.400e-05 | 4.000e-05 | 5.600e-05 | 7.200e-05 | 8.800e-05 | 3.200e-04 |
| lambda09 | lambda10 | lambda11 | lambda12 | lambda13 | B3 | A0Y | A1Y |
| 5.200e-04 | 5.700e-04 | 1.0000000 | 10.000000 | 100.00000 | 1.1500000 | 0.0093470 | 0.6250000 |
| eta1 | eta2 | eta3 | eta4 | eta5 | eta6 | eta7 | eta8 |
| 0.0 | 0.8500000 | 0.9700000 | 0.9900000 | 1.0000000 | 0.9900000 | 0.9700000 | 0.5000000 |
| eta09 | eta10 | eta11 | eta12 | eta13 | B2 | A2F | A2Y |
| 0.1000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.3500000 | 2.8169999 | 6.1310000 |

Рис. 9. Параметры материала бетонного образца

| | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|
| EV1 | EV2 | EV3 | EV4 | EV5 |
| 0.0 | -0.0015000 | -0.0043000 | -0.0101000 | -0.0305000 |
| EV6 | EV7 | EV8 | EV9 | EV10 |
| -0.0513000 | -0.0726000 | -0.0943000 | -0.1740000 | -0.2080000 |
| C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| 0.0 | 0.0220420 | 0.0480517 | 0.0771470 | 0.1465800 |
| C6 | C7 | C8 | C9 | C10 |
| 0.2210820 | 0.3136580 | 0.4798550 | 2.8015440 | 4.2848701 |
| K1 | K2 | K3 | K4 | K5 |
| 14.690000 | 14.690000 | 14.900000 | 15.650000 | 18.620001 |
| K6 | K7 | K8 | K9 | K10 |
| 21.600000 | 24.570000 | 26.820000 | 6034.0000 | 73.470001 |

Рис. 10. Параметры уравнения состояния бетонного образца

Визуализация результатов моделирования в пакете ANSYS/LS-DYNA процесса внедрения пули в бетон представлена на рис. 11.

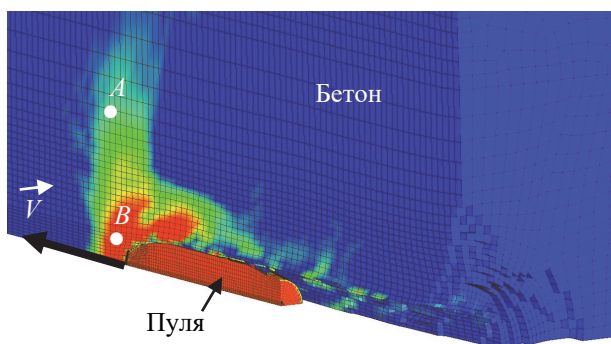


Рис. 11. Напряжения сжатия в модели бетона без наполнителя: точка A – $\sigma = 10$ МПа, точка B – $\sigma = 38$ МПа

На рис. 12 показаны графики изменения скорости сердечника пули при моделировании процесса разрушения бетонного образца в пакете ANSYS/LS-DYNA с применением и без применения гранитных наполнителей. Как видно из рис. 12, замедление пули происходит быстрее в случае явного моделирования гранитного наполнителя, поскольку снаряд на своем пути воспринимает локальные, более прочные гранитные преграды, и теряет на создание разрушающих напряжений больше энергии.

С целью оценки достоверности применяемой расчетной модели проведены натурные испытания процесса разрушения бетонной конструкции пулей. Суть эксперимента заключается в обстреле бетонных образцов из винтовки СВД с дистанции 50 м бронебойными пулями калибра 7.62R54 с последующим изучением состояния образца и замером последствий пулевого воздействия.

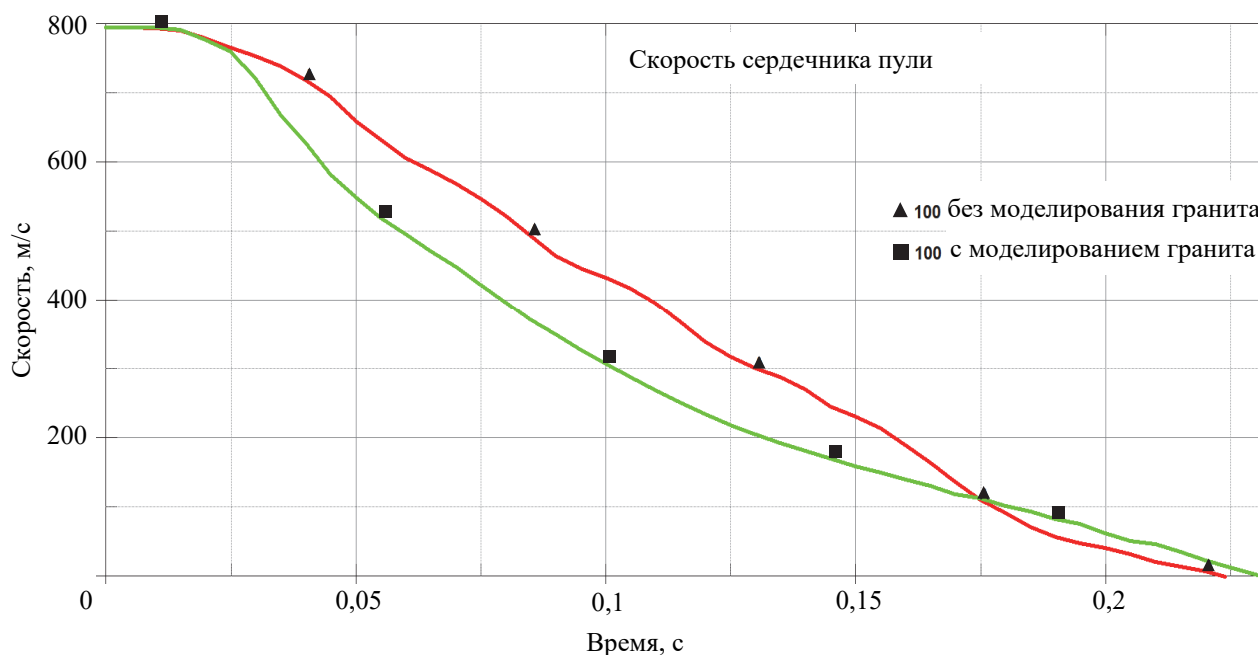


Рис. 12. Изменение скорости сердечника пули

Для изготовления бетонных образцов с прочностью на сжатие 40 МПа использованы материалы: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н; песок карьерный; гранитный щебень с фракцией 15–20 мм; вода.

Масса компонентов раствора, используемых для изготовления бетонных образцов массой 50 кг, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Масса компонентов образца

| Портландцемент, кг | Песок, кг | Щебень, кг | Вода, кг |
|--------------------|-----------|------------|----------|
| 8,4 | 13,8 | 24,4 | 3,4 |

Выдержка бетонных образцов для набора прочности до проведения испытаний, согласно нормативной документации на бетон, составила 28 дней.

С целью уменьшения влияния краевых эффектов выстрелы производились в образцы по вершинам равностороннего треугольника со сторонами 125 мм, с отступом от края образца не менее 100 мм.

Кроме того, при каждом выстреле фиксировались состояние и характер разрушения образца, глубина проникновения пули в образец и размеры отколотых частей на его лицевой стороне.

Общий вид бетонного образца после трех выстрелов показан на рис. 13.

В табл. 2 сведены усредненные результаты сравнения натуральных испытаний и численных расчетов величины проникновения пули в образец при явном моделировании бетона с гранитным наполнителем и без него.



Рис. 13. Фото испытываемого образца: 1, 2, 3 – места внедрения трех пуль в образец

Таблица 2

Результаты сравнения натуральных и численных экспериментов

| Показатель | Без наполнителя | С наполнителем | Натурный эксперимент |
|-------------------|-----------------|----------------|----------------------|
| Проникновение, мм | 107,5 | 71 | 78,36 |
| Погрешность, % | 37,2 | 9,39 | – |

В свою очередь пули, которые внедрялись в бетон, получали значительные повреждения (рис. 14), что указывает на высокие напряжения, возникающие при взаимодействии исследуемых материалов.



Рис. 14. Пуля, извлеченная из бетонного образца

Заключение. Проведенные натурные испытания процесса разрушения бетонных образцов показали: моделирование бетонных образцов с гранитным наполнителем позволяет значительно

повысить достоверность получаемых данных, что подтверждает релевантность разработанных моделей и методики расчета, представленных в работе.

Дальнейшие исследования в этом направлении вызывают научный интерес с точки зрения влияния особенностей объектов и способов высокоскоростного взаимодействия (в частности, изучение дальнейшего влияния форм объектов внедрения и включений, а также резонансные эффекты взаимодействия).

Интересно также применение предлагаемого пакета и при моделировании способа подведения энергии в зону разрушения, рассмотрении для примера процесса попадания нескольких пуль в одно место с определенным интервалом времени, что может послужить целью дальнейших исследований в данном направлении.

Список литературы

1. Боровиков А. М., Уголев Б. Н. Справочник по древесине. М.: Лесная пром-сть, 1989. 293 с.
2. Гаранин В. Н. Обоснование скорости резания древесины с использованием модели обработки анизотропного материала // Труды БГТУ. Сер. 2, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 2 (236). С. 299–305.
3. Lai J. Properties and Modeling of Ultra-High-Performance. Concrete Subjected to Multiple Bullet Impacts // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. Vol. 30. 10 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/326802066_Properties_and_Modeling_of_Ultra-High-Performance_Concrete_Subjected_to_Multiple_Bullet_Impacts (дата обращения: 22.09.2021).
4. Mohotti D., Ngo T., Mendis P. Numerical Simulation of Impact and Penetration of Ogival Shaped Projectiles through Steel Plate Structures. 2007. 13 p. URL: https://www.academia.edu/17321638/Numerical_Simulation_of_Impact_and_Penetration_of_Ogival_Shaped_Projectiles_through_Steel_Plate_Structures (дата обращения: 24.09.2021).
5. Zochovski P. Ballistic Impact Resistance of Bulletproof Vest Inserts Containig Printed Titanium Structures // MDPI. Metals. 2021. No. 11. 23 p. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/2/225> (дата обращения: 24.09.2021).
6. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 2. Materials model. Livermore Software Technology Corporation. 2019. 1613 p.
7. Damage and Failure Mechanism of Bullets Impact Sapphire based on LS-DYNA / L. Siyu [et al.] // Advances in Engineering Research. 2018. Vol. 146. P. 178–182.
8. Nyanor P., Hamada A. S., Hassan M. A. Ballistic Impact Simulation of Proposed Bullet Proof Vest Made of TWIP Steel, Water and Polymer Sandwich Composite Using FE-SPH Coupled Technique. Key Engineering materials. 2018. Vol. 786. P. 302–313.
9. Sai L., Weigui Z., Zhenhua L. An FEM-SPH coupled model for simulating penetration of armor-piercing bullet into ceramic composite armors and glass composite armors // Explosion and Shock Waves. 2021. Vol. 41. No. 1. 12 p. URL: <https://pubs.cstam.org.cn/article/doi/10.11883/bzycj-2020-0069?viewType=HTML> (дата обращения: 30.09.2021).
10. Fras T., Murzyn A., Pawlowski P. Defeat mechanism provided by slotted add-on bainitic plates against small-calibre 7.62 mm ×51 AP projectiles // International Journal of Impact Engineering. 2017. No. 103. P. 241–253.
11. Soriano-Moranchel F. Simulation of bullet Fragmentation and Penetration in Granular Media // MDPI, Materials. 2020. No. 13. 13 p. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5243> (дата обращения: 30.09.2021).
12. Schwer L. Aluminum plate perforation: a comparative case study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and smooth particle hydrodynamics // 7th European LS-DYNA Conference. 2009. 28 p. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/ALUMINUM-PLATE-PERFORATION-%3A-A-COMPARATIVE-CASE-%2C-%2C-Schwer/822efc3adc2f42333e0317e75cf4fb7a9659d8bd> (дата обращения: 30.09.2021).
13. Banerjee A., Dhar S., Acharya S., Datta D., Nayak N. Numerical simulation of ballistic impact of armor steel plate by typical armour piercing projectile // Procedia Engineering. 2017. No 173. P. 347–354.
14. Разработать и внедрить методику компьютерного моделирования пулестойкой защиты строительных конструкций: отчет о НИР (заключ.) / ЗАО «Струнные технологии»; рук. С. В. Артюшевский. Минск, 2021. 104 с. № ГР 20212668.

15. Murugesan M., Jung D. W. Johnson cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications. *Materials*, 2019. 12. 609. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/ma12040609>. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6416717/pdf/materials-12-00609.pdf> (дата обращения: 30.09.2021).

16. Clearly P. W., Monaghan J. J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics // *Comput. Phys.* 1999. Vol. 148. No 1. P. 227–264.

17. Karajan N. Particles as Discrete Elements in LS-DYNA: Interaction with themselves as well as Deformation or Rigid Structures // 11th LS-DYNA Forum, Ulm. 2012. 25 p. URL: <https://docplayer.net/65403830-Particles-as-discrete-elements-in-ls-dyna-interaction-with-themselves-as-well-as-deformable-or-rigid-structures.html> (дата обращения: 04.10.2021).

References

1. Borovikov A. M., Ugolev B. N. Handbook of wood, Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 293 p. (In Russian).

2. Garanin V. N. Substantiation of wood cutting speed using anisotropic material processing model. *Trudy BGTU* [Proceeding of BSTU], issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources, 2020, pp. 299–305 (In Russian).

3. Lai J. Properties and Modeling of Ultra-High-Performance Concrete Subjected to Multiple Bullet Impacts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, vol. 30. 10 p. Available at: https://www.researchgate.net/publication/326802066_Properties_and_Modeling_of_Ultra-High-Performance_Concrete_Subjected_to_Multiple_Bullet_Impacts (accessed 22.09.2021).

4. Mohotti D., Ngo T., Mendis P. Numerical Simulation of Impact and Penetration of Ogival Shaped Projectiles through Steel Plate Structures, 2007. 13 p. Available at: https://www.academia.edu/17321638/Numerical_Simulation_of_Impact_and_Penetration_of_Ogival_Shaped_Projectiles_through_Steel_Plate_Structures (accessed 24.09.2021).

5. Zochovski P. Ballistic Impact Resistance of Bulletproof Vest Inserts Containig Printed Titanium Structure. *MDPI. Metals*, 2021, no. 11. 23 p. Available at: <https://www.mdpi.com/2075-4701/11/2/225> (accessed 24.09.2021).

6. LS-DYNA Keyword User's Manual. Vol. 2. Materials model. Livermore Software Technology Corporation Publ., 2019. 1613 p.

7. Siyu L. [et al.]. Damage and Failure Mechanism of Bullets Impact Sapphire based on LS-DYNA. *Advances in Engineering Research*, 2018, vol.146, pp. 178–182.

8. Nyanor P., Hamada A. S., Hassan M. A. Ballistic Impact Simulation of Proposed Bullet Proof Vest Made of TWIP Steel, Water and Polymer Sandwich Composite Using FE-SPH Coupled Technique. *Key Engineering materials*, 2018, vol. 786, pp. 302–313.

9. Sai L., Weigui Z., Zhenhua L. An FEM-SPH coupled model for simulating penetration of armor-piercing bullet into ceramic composite armors and glass composite armors. *Explosion and Shock Waves*, 2021, vol. 41, no. 1. 12 p. Available at: <https://pubs.cstam.org.cn/article/doi/10.11883/bzycj-2020-0069?viewType=HTML> (accessed 30.09.2021).

10. Frasz T., Murzyn A., Pawlowski P. Defeat mechanism provided by slotted add-on bainitic plates against small-calibre 7.62 mm ×51 AP projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, no. 103, pp. 241–253.

11. Soriano-Moranchel, F. Simulation of bullet Fragmentation and Penetration in Granular Media. *MDPI, Materials*, 2020, no. 13. 13 p. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/22/5243> (accessed 30.09.2021).

12. Schwer L. Aluminum plate perforation: a comparative case study using Lagrange with erosion, multi-material ALE, and smooth particle hydrodynamics. *7th European LS-DYNA Conference*, 2009. 28 p. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/ALUMINUM-PLATE-PERFORATION-%3A-A-COMPARATIVE-CASE-%2C-%2C-Schwer/822efc3adc2f42333e0317e75cf4fb7a9659d8bd> (accessed 30.09.2021).

13. Banerjee A., Dhar S., Acharyya S., Datta D., Nayak N. Numerical simulation of ballistic impact of armor steel plate by typical armour piercing projectile. *Procedia Engineering*, 2017, no 173, pp. 347–354.

14. *Razrabotat' i vnedrit' metodiki komn'yuternogo modelirovaniya pulestoykoy zashchity stroitel'nykh konstruktsiy: otechet o NIR (zaklyuch.)* [To develop and introduce a methodology for computer modeling of bulletproof protection of building structures: report on research (concluding)]. CJSC “String Technologies”; supervizor S. V. Artyushevsky. Minsk, 2021. 104 p. No. GR 20212668.

15. Murugesan M., Jung D. W. Johnson cook material and failure model parameters estimation of AISI-1045 medium carbon steel for metal forming applications. *Materials*, 2019; 12, 609. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/ma12040609>. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6416717/pdf/materials-12-00609.pdf> (accessed 30.09.2021).

16. Clearly P. W., Monaghan J. J. Conduction modelling using smoothed particle hydrodynamics. *Comput. Phys*, 1999, vol. 148, no 1, pp. 227–264.

17. Karajan N. Particles as Discrete Elements in LS-DYNA: Interaction with themselves as well as Deformation or Rigid Structures. *11th LS-DYNA Forum, Ulm*, 2012. 25 p. Available at: <https://docplayer.net/65403830-Particles-as-discrete-elements-in-ls-dyna-interaction-with-themselves-as-well-as-deformable-or-rigid-structures.html> (accessed 04.10.2021).

Информация об авторах

Гаранин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры деревообрабатывающих станков и инструментов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: dosy@belstu.by

Юницкий Анатолий Эдуардович – доктор философии транспорта, генеральный конструктор, ООО «Астроинженерные технологии»; генеральный конструктор. ЗАО «Струнные технологии» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 33, Республика Беларусь). E-mail: a@unitsky.com

Артюшевский Сергей Владимирович – заместитель генерального конструктора по науке. ЗАО «Струнные технологии» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, 33, Республика Беларусь). E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

Овсянко Владимир Александрович – начальник группы расчета динамики систем КБ «Инженерные расчеты» ЗАО «Струнные технологии» (220089, г. Минск, ул. Железнодорожная, д. 33, Республика Беларусь). E-mail: v.ovsyanko@unitsky.com

Пронкевич Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры био- и наномеханики. Белорусский государственный университет (220030, г. Минск, пр-т Независимости, 4, Республика Беларусь). E-mail: pronkevichsa@bsu.by

Information about the authors

Garanin Victor Nikolaevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, the Department of Woodworking Machines and Tools. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dosy@belstu.by

Unitsky Anatoly Eduardovich – PhD in Transport, General Design Engineer. Astroengineering Technologies LLC; General Design Engineer. Unitsky String Technologies, Inc. (33, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a@unitsky.com.

Artyushevsky Sergey Vladimirovich – Deputy General Designer for Science of Unitsky String Technologies, Inc. (33, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

Ovsyanko Vladimir Aleksandrovich – Head of the Engineering Calculations Group. Unitsky String Technologies, Inc. (33, Zheleznodorozhnaya str., 220089, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.ovsyanko@unitsky.com

Pronkevich Sergey Aleksandrovich – PhD (Physical and Mathematical), Assistant Professor, the Department of Bio- and Nanomechanics. Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave, 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pronkevichsa@bsu.by

Поступила после доработки 25.02.2022