

- фессиональное образование и общество. — 2015. — №2(14). — С. 102–104.
7. Логачёв М.С. Проблемы мониторинга качества образования / М.С. Логачёв // Автоматизированные системы управления качеством образовательного процесса: моногр. // М.С. Логачёв, Ю.Н. Самарин, М.С. Тигина. — М.: МГУП имени Ивана Федорова, 2016. — С. 71–101.
8. Семь задач цифровизации российского образования [Электрон. ресурс]. — Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/education/5d9ccba49a7947d5591e93ee> (дата обращения: 20.02.2021).

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК НА КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ОБЪЕКТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ ЛЮБОГО ТИПА

## MODELING THE CONSEQUENCES OF EXPLOSIVE LOADS ON STRUCTURAL ELEMENTS OF INFRASTRUCTURE OBJECTS OF ANY TYPE

### Перевесенский Сергей Александрович

Курсант 4-го курса  
Академии гражданской защиты МЧС России



### Perevesenskiy Sergej Aleksandrovich

4th year cadet of the Civil Protection Academy  
of the Ministry of Emergency Situations of Russia

### Сорокин Алексей Юрьевич

Преподаватель кафедры информатики  
и вычислительной техники Академии гражданской  
защиты МЧС России



### Sorokin Aleksej Jur'evich

Lecturer at the Department of Informatics and Computer  
Engineering of the Academy of Civil Protection of the Ministry  
of Emergency Situations of Russia

**Аннотация.** Настоящая работа посвящена разработке программного обеспечения, реализующего методику определения последствий взрывных нагрузок на основе распределения механической энергии. Приведено общее описание программы и принцип работы, а так же продемонстрированы основные функциональные элементы, промежуточная отрисовка, входные и выходные данные.

**Ключевые слова:** модели, безопасность, информационные технологии, методика.

**Abstract.** This work is devoted to the development of software that implements the method for determining the consequences of explosive loads based on the distribution of mechanical energy. The general description of the program and the principle of operation are given, as well as the main functional elements, intermediate rendering, input and output data are demonstrated.

**Keywords:** Models, security, information technology, methodology.

### Введение

В настоящее время существуют определенные потребности в научно-методическом аппарате, позволяющем определять характеристики конструкции сооружения, обеспечивающие устойчивость объекта инфраструктуры к воздействию поражающих факторов взрыва. Актуализация данной проблемы с нормативной точки зрения инициируется следующими законодательными требованиями:

Законодательством Российской Федерации определено, что защита критически важных объектов инфраструктуры от различных ЧС должно осуществляться по средствам повышения уровня их защищенности [1].

Законы от транспортной безопасности и противодействию терроризму требуют обеспечивать работу на предупреждение и минимизацию последствий [2].

Исходя из анализа статистики реализации вышеописанных угроз, наиболее распространенная форма проявления диверсионных или террористических актов, заключается в подрывной деятельности [3].

В целях решения данной проблемы, был разработан научно-методический аппарат, основанный на распределении в конструкции механической энергии взрыва [4]. В целях упрощения использования приведенной методики, ведется работа по ее цифровизации. На данный момент разработан прототип, функцио-

нальным и техническим особенностям которого и посвящается настоящая работа.

### Описание цифровой интерпретации методики

Благодаря тому, что на данной стадии развития технологий мы можем использовать мощности ЭВМ, а также создавать 3-D модель требуемых объектов. Мы можем создать симуляцию воздействия избыточного давления на объект.

С функциональной точки зрения, цифровая версия приведенной методики основана на принципе декомпозиции конечного объекта на составляющие элементы по аналогии с молекулярно-кристаллической решеткой. Так как известно, что воздушная ударная волна представляет собой область сжатия молекул воздуха, которая двигается в заданном направлении, принцип декомпозиции можно применить и к ней.

Таким образом, представляет конечный объект в виде взаимосвязанных частиц, размер которых может быть масштабирован в зависимости от потребностей и мощностей ЭВМ. Понятие взаимосвязанности, в данном случае подразумевает то, что для отрыва частиц друг от друга, к ним необходимо приложить энергию, которая будет превышать энергию их связи. При этом целостность связи с физической точки зрения обуславливает упругость деформации, нарушение целостности приводит к деформации не упругой.

Декомпозиция воздушной ударной волны так же производится на частицы. Каждая частица имеет свой вектор и характеристику энергетического состояния. Графическая интерпретация декомпозиции приведена на рис. 1.

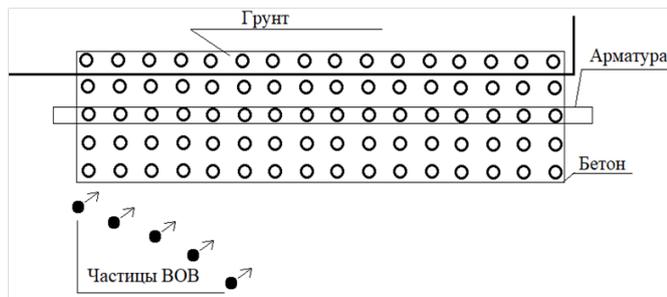


Рис. 1. Графическая интерпретация принципа декомпозиции

В ходе такого моделирования, с математической точки зрения будут фигурировать следующие величины:

- $p_0$  — давление частицы воздушной ударной волны;
- $v$  — вектор движения частицы воздушной ударной волны;
- $z$  — обратная реакция материала конструкции на нагрузку с учетом распределения напряжения;
- $y$  — напряжение создаваемое внутри материала конструкции;
- $v_y$  — скорость распределения напряжения внутри материала конструкции.
- $G_T$  — предел текучести;
- $E$  — модуль упругости;

На базе рис. 1 и приведенных величин, процесс моделирования можно описать следующим образом. Частицы эмитирующие ударную волну с рассчитанной по методике скоростью соударяются с элементом конструкции. При этом определяется время реакции конструкции, а следовательно, и величина, определяющая время действия нагрузки от одной частицы ВОВ.

Частица ударной волны при соударении, оказывает на конструкцию давление  $p_0$ , вызывая в ней напряжение и упругую обратную реакцию, при этом за время взаимодействия, часть энергии частицы ударной волны, распределяется по конструкции увеличивая общее напряжение.

Материал конструкции в свою очередь, будет стремиться распределить собственное напряжение на любые элементы, с которыми соприкасается по оси нагрузки.

Напряжение первого материала конструкции, передаваемое второму, воспринимается им как нагрузка, которую он так же стремится распределить.

Для каждого материала, существует порог напряжения, который может в нем возникать. Данный порог, численно равен пределу текучести для соответствующей площади сечения. Для подземных сооружений, условно возможно принять, что грунт обладает бесконечным пределом текучести, так как его деформации, нас не интересуют.

Таким образом, для взаимодействия частиц ударной волны с декомпозированной структурой объекта строительной конструкции, задаются следующие условия:

$$P_0 < G_T, \begin{cases} z = E - y, z \leq G_T \\ \bar{v} = 0, z < G_T \\ \bar{v} = z - G_T, z \geq G_T \end{cases}$$

$$P_0 > G_T, \begin{cases} \bar{v} = \frac{P_0 + G_T}{2} \\ z = 0, \text{разрушено} \end{cases}$$

$P_0 = G_T, z, P_0 = const$  (идеальное упругое соударение)

На базе данных условий программа высчитывает общий объем повреждений, а также минимальные и максимальные энергетические нагрузки на элемент. При этом показывает квадратичное отклонение нагрузки и графически показывает места возможных дефектов внутри структуры материального объекта.

Пример моделирования на базе прототипа цифрового исполнения приведенной методики

Входными данными являются:

- 3D конструкции в формате .obj (рис. 2);
- $N$  — количество векторов ударной волны;
- $E_0$  — энергия одного вектора ударной волны;
- $p_0$  — давление вектора ударной;
- $I$  — размер кубика для разбиения конструкции
- $v$  — скорость распределения напряжения внутри материала конструкции (по координатам сектора);
- $G_T$  — пределе текучести материала (по координатам сектора);
- $E$  — модуль упругости материала (по координатам сектора).

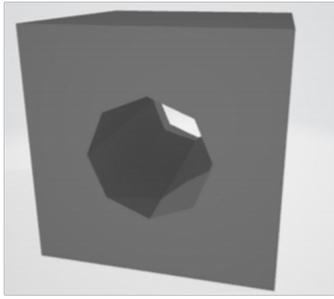


Рис. 2. 3D объект конструктивного элемента

После ввода входных данных, программа перерабатывает 3D модель в физическую 3D модель объекта с учетом декомпозиции и заданными характеристиками (рис. 3–4).

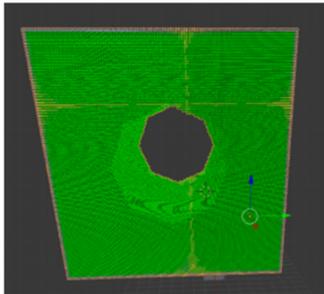


Рис. 3. Декомпозированная 3D модель с заданными характеристиками

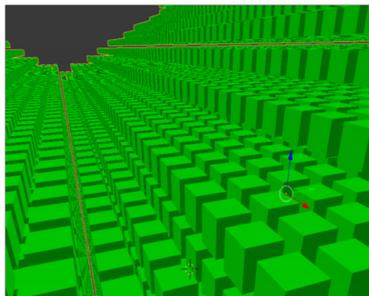


Рис. 4. Декомпозиция 3D модели

После переработки 3D модели, запускается процесс симуляции. На данный момент из-за тестирования программы на слабом ЭВМ, отрисовка воздействия происходит в плоскостном срезе. Срез отрисовки настраивается (рис. 5).

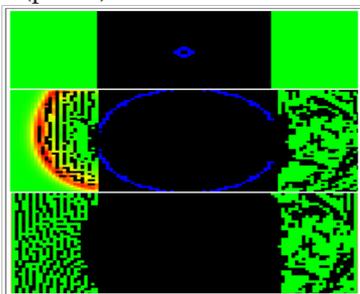


Рис. 5. Моделирование воздействия ударной волны

После моделирования, программа выдает результаты (рис. 6).

```
Destroyed 307450 of 863600
E min 261900
E max 1.70368e+12
E quadratic mean 3.3532e+10
```

Рис. 6. Результат моделирования

### Заключение

В настоящее время все больше процессов подвергаются автоматизации. Разрабатываются различные ПО для решения целевых задач. Моделирование последствий взрывных нагрузок на конструктивные элементы объектов инфраструктуры также не является исключением, и в будущем будет автоматизирована.

Исследование показало, что данная концепция достаточно жизнеспособна и требует сравнительно низких затрат для внедрения. Главное достоинство такого подхода заключается в скорости и точности анализа, а самое главное экономит время для принятия решений и разработки соответствующих защитных мероприятий.

### Список литературы

1. Основы государственной политики в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на период до 2030 года.
2. Федеральный закон от 06.03.2006 N 35-ФЗ (ред. от 18.03.2020) «О противодействии терроризму».
3. Распоряжение Правительства РФ от 30.07.2010 № 1285-р (ред. от 04.07.2019) «Об утверждении Комплексной программы обеспечения безопасности населения на транспорте».
4. Сорокин А.Ю. Универсальный подход к моделированию взрывных нагрузок на объекты инфраструктуры любого типа / А.Ю. Сорокин // Безопасность и охрана труда — 2019: тр. Междунар. молодеж. конф. (Москва, 10–13 декабря 2019 г.). — М.: МЭИ, 2019. — С. 166–169.