

МЕХАНИКА

Научная статья

УДК 531.395

DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-21-34

<https://elibrary.ru/gpjxcd>**Численное моделирование фрагментации
цилиндрической оболочки****Сергей Михайлович Герцик¹, Владислав Авенирович Конюхов²,
Сергей Владимирович Лекомцев³**¹Центр компетенций и обучения, г. Саров, Россия^{2,3} Институт механики сплошных сред УрО РАН, г. Пермь, Россия¹smgertsik@compcenter.org²koniukhov.v@icmm.ru³lekomtsev@icmm.ru

Аннотация. Знание параметров фрагментации конструкции при ее быстропотекающем разрушении необходимо для обеспечения безопасности людей и окружающих объектов. Характеристики фрагментов и их пространственно-массовое распределение, получаемые в результате экспериментов, являются существенно неоднородными. Это может быть связано с неоднородностью структуры реальных материалов, которую нужно учитывать при проведении расчетов. В данной работе приведены результаты численного моделирования задачи фрагментации цилиндрической оболочки с учетом вероятностного распределения параметра разрушения. Вычисления выполнены в отечественном пакете программ ЛОГОС с применением метода конечных элементов. Разрушение оболочки реализовано за счет разделения узловых связей, критерием наступления которого является превышение величины пластической деформации критического значения. Достоверность полученных результатов подтверждена сравнением с экспериментальными данными и сходимостью решения при увеличении числа узловых неизвестных. Выполнен анализ влияния критерия разрушения, задаваемого в виде константы материала и в виде параметра, распределенного по нормальному закону. Показано, что использование вероятностного критерия разрушения позволяет прогнозировать параметры фрагментации, качественно согласующиеся с экспериментальными данными. Установлено, что степень дискретизации оболочки оказывает существенное влияние на параметры фрагментов, но практически не меняет вида их распределения по массовым группам.

Ключевые слова: *фрагментация; разрушение; цилиндрическая оболочка; численное моделирование; пакет ЛОГОС; вероятностный закон распределения; метод конечных элементов*

Для цитирования: Герцик С.М., Конюхов В.А., Лекомцев С.В. Численное моделирование фрагментации цилиндрической оболочки // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. 2024. Вып. 4(67). С. 21–34. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-21-34. <https://elibrary.ru/gpjxcd>.



Эта работа © 2024 Герцик С.М., Конюхов В.А., Лекомцев С.В. распространяется под лицензией CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 124020700047-3.

Статья поступила в редакцию 05.10.2024; одобрена после рецензирования 20.10.2024; принята к публикации 01.12.2024.

MECHANICS

Research article

Numerical Modeling of Cylindrical Shell Fragmentation

Sergey. M. Gertsik¹, Vladislav. A. Koniukhov², Sergey. V. Lekomtsev³

¹Competence and Training Center, Sarov, Russia

^{2,3}Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russia

¹smgertsik@compcenter.org

²koniukhov.v@icmm.ru

³lekomtsev@icmm.ru

Abstract. Knowledge of the fragmentation of a structure during its rapid destruction is essential for ensuring the safety of people and surrounding objects. The characteristics of fragments and their space-mass distribution obtained as a result of experiments are essentially inhomogeneous. This may be due to the inhomogeneity of the structure made of real materials, which should be taken into account in calculations. The paper presents the results of numerical modeling of the problem of cylindrical shell fragmentation taking into account the probability distribution of the fracture parameter. The calculations are performed in the LOGOS software using the finite element method. Fracture of the shell is realized by separating the nodal bonds. The criterion for the onset of fracture is the exceedance of the critical value of plastic strains. The validity of the obtained results is confirmed by their agreement with the experimental data and convergence of the solution with increasing number of nodal unknowns. The influence of the fracture criterion, which is set as a material constant and as a parameter distributed according to the normal probability law, is analyzed. It is shown that the use of the probabilistic fracture criterion allows predicting the parameters of the fragmentation field, which are qualitatively consistent with the experimental data. It is established that the degree of shell discretization has a significant effect on the fragment parameters, but practically does not change the type of their mass distribution.

Keywords: fragmentation; destruction; cylindrical shell; numerical modeling; LOGOS software; probability law of distribution; finite element method

For citation: Gertsik, S.M., Koniukhov, V.A. and Lekomtsev, S.V. (2024), "Numerical Modeling of a Cylindrical Shell Fragmentation", *Bulletin of Perm University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, no. 4(67), pp. 21-34. DOI: 10.17072/1993-0550-2024-4-21-34. <https://elibrary.ru/gpjxcd>.

Acknowledgments: the study was made in the framework of the government task, registration number of the theme 124020700047-3.

The article was submitted 05.10.2024; approved after reviewing 20.10.2024; accepted for publication 01.12.2024.

Введение

Одной из наиболее сложных и приоритетных задач, решаемых с помощью численного моделирования, является прогнозирование разрушения материалов и конструкций в результате взрывного воздействия различной природы. Данная проблема особенно актуальна в современном мире, поскольку взрывчатые вещества широко используются в различных отраслях промышленности: горнодобывающей [1], металлургической [2], строительной [3] и других [4].

С целью повышения защищенности людей и объектов проводятся исследования различных аспектов взрывного воздействия. В работе [5] выполнено экспериментальное исследование влияния предварительного повреждения многослойного стекла первичными осколками перед прохождением взрывной волны. Возможные последствия взрыва резервуара для хранения авиационного керосина определены в [6]. В статье [7] исследовано напряженно-деформированное состояние 3D-ауксетических решетчатых сэндвич-панелей под воздействием воздушного взрыва. Авторы публикации [8] оценили эффективность применения защитных пластин с помощью эксперимента в масштабе 1:5, имитирующего взрыв нефтепровода в городе Циндао (Китай).

Проведение натурных экспериментов сопряжено с высокими экономическими затратами и повышенной опасностью для окружающих людей и объектов, поэтому в настоящее время активно разрабатываются различные численные методы моделирования быстропотекающего разрушения исследуемых конструкций. В качестве основных численных методов применяются: метод конечных элементов (МКЭ) (Finite Element Method – FEM), расширенный МКЭ (Extended FEM – XFEM), произвольный и сопряженный методы Эйлера – Лагранжа (Arbitrary Lagrangian – Eulerian method – ALE, Coupled Eulerian – Lagrangian method – CEL), метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics – SPH).

Одним из самых распространенных и проработанных численных алгоритмов, используемых для решения рассматриваемого класса задач, является метод конечных элементов. С его помощью в работе [9] проведено исследование разрушения многослойного стекла с помощью разделения расчетной модели по узлам на основании критерия разрушения по напряжениям. Влияние величины шага нагружения и степени дискретизации модели при решении задачи разрушения упруго-хрупкой полосы материала определено в [10]. В статье [11] численно оценено влияние отверстий, полученных в результате проведения взрывных работ, на характер распространения трещин.

Одним из способов моделирования ударной волны является применение эмпирического метода CONWER, позволяющего имитировать воздействие в виде действующего на исследуемую модель изменяющегося поля давления. Несмотря на ряд допущений, упрощений и ограниченной области применения, данный подход не утратил свою актуальность. Он используется в [12] для определения взрывостойкости железобетонных плит и показал хорошее соответствие численных и экспериментальных данных. С другой стороны, алгоритм CONWER не позволил получить достоверные количественные результаты в исследовании [13], которое посвящено разработке вероятностной модели взрывной нагрузки, действующей на купольную конструкцию.

Широкое распространение для решения задач разрушения материалов и конструкций получили методы ALE и CEL. Они активно используются для моделирования подводных взрывов, лежащих вне области применимости метода CONWER. В качестве примера перечислим несколько работ. В [14] с помощью метода ALE проводится численное моделирование подводного взрыва опор морского моста с целью определения динамической реакции и механизма разрушения. Поведение моделей кораблей, подвергающихся подводной ударной волне, исследовано в [15, 16] с применением метода CEL. Однако область применения рассматриваемых методов не ограничена задачами данного класса. В работах [17, 18] эти подходы используются для моделирования разрушения различных железобетонных конструкций.

В последнее время активно разрабатывается новый инструмент для решения широкого круга инженерных задач – нейронная сеть. Она представляет собой возможную альтернативу дорогостоящим натурным экспериментам и ресурсоемкому численному моделированию. Примерами использования нейронных сетей для определения параметров взрыва и разрушения могут служить публикации [19–21]. В первой из них с применением глубокого машинного обучения осуществлено прогнозирование динамического поведения железобетонных плит при взрывном воздействии. Предметом исследования работы [20] является определение эффективности различных моделей машинного обучения для прогнозирования параметров импульсного воздействия и давления. В статье [21] с помощью методов машинного обучения осуществлено определение пикового избыточного давления отраженных ударных волн.

Одним из вопросов, представляющих научный и практический интерес в данном направлении, является определение необходимости учета разброса параметров реальных материалов и взрывного нагружения. Данной теме посвящена работа [22], в которой приведено несколько вероятностных моделей для прогнозирования разрушения стальных колонн, подверженных взрыву. Их использование обусловлено необходимостью учитывать изменчивость различных факторов: колебаний атмосферных условий, повторяемости результатов натурных испытаний при идентичных экспериментальных условиях, погрешности моделирования. Неопределенность параметров взрывного нагружения также была отражена в работе [13]. В ней сделано заключение, что при проектировании взрывозащитных систем наиболее подходящей вероятностной моделью взрыва является распределение Гаусса.

В данной работе обсуждается использование критерия разрушения на основе нормального закона распределения, который отражает неоднородную структуру реальных материалов, исследуется влияние степени дискретизации конечно-элементной модели на параметры фрагментов, оценивается соответствие результатов расчетов экспериментальным данным.

1. Математическая постановка задачи и численный алгоритм решения

В работе моделируется чрезвычайная ситуация, возникающая в резервуаре для хранения технологических жидкостей или на участке магистрального трубопровода, осуществляющего транспортировку нефти или газа. В качестве примера решается задача воздействия ударной волны на тонкостенную цилиндрическую оболочку (средний радиус $R = 193.3$ мм, длина $L = 345.6$ мм, толщина $h = 1.7$ мм) при подрыве взрывчатого вещества массой 1 кг в тротиловом эквиваленте, расположенного внутри (рис. 1). Материал конструкции считается изотропным упругопластическим с изотропным упрочнением (модуль Юнга $E = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, начальный предел текучести $\sigma_0 = 400$ МПа, модуль упрочнения $E_T = 1$ ГПа).

Математическая постановка краевой задачи при отсутствии массовых сил имеет следующий вид:

$$\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_S t_i \delta x_i dS = 0, \quad (1)$$

где V – объем оболочки, ρ – плотность материала, x_i и δx_i – i -я компонента вектора перемещений и ее вариация, σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, S – поверхность, на которой действуют внешние силы, t_i – i -я компонента вектора внешней силы, точками сверху обозначена вторая производная по времени.

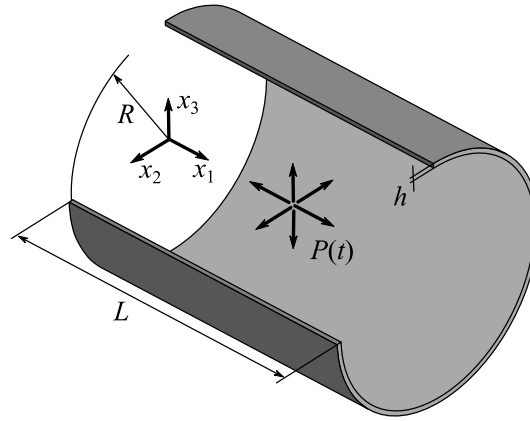


Рис. 1. Круговая цилиндрическая оболочка (сечение)

Связь напряжений и деформаций для изотропного материала представляется известным образом:

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где λ и μ – параметры Ламе, $\theta = \varepsilon_{ii}$, δ_{ij} – дельта Кронекера, ε_{ij} – компоненты тензора деформаций.

Условие текучести записывается в виде:

$$\frac{3}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \sigma_y^2 \leq 0, \quad (3)$$

$$\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij}, \quad s_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}),$$

где s_{ij} – компоненты девиатора тензора напряжений, α_{ij} – центр поверхности пластичности.

Предел текучести материала оболочки σ_y определяется соотношением:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p, \quad E_p = \frac{E_T E}{E - E_T}, \quad (4)$$

где β – параметр упрочнения, ε_p – пластическая деформация, E_p – модуль пластического упрочнения.

Взрывное нагружение реализовано с помощью эмпирического метода CONWER, согласно которому изменение давления описывается уравнением Фридлендера:

$$P(t) = P_{so} \left(1 - \frac{t - t_a}{t_d} \right) \exp \left(-A \frac{(t - t_a)}{t_d} \right), \quad (5)$$

где $P(t)$ – давление в момент времени t , P_{so} – пиковое избыточное давление в момент времени $t = t_a$, t_a – время прибытия ударной волны, t_d – продолжительность фазы избыточного давления, A – коэффициент затухания. Подробное описание метода и способ моделирования распространения взрывной волны в пространстве представлен в работе [23].

Начальные условия имеют вид:

$$\sigma_{ij}|_{t=0} = 0, \quad x_i|_{t=0} = 0, \quad \dot{x}_i|_{t=0} = 0. \quad (6)$$

Разрушение конструкции в результате взрыва реализовано за счет разделения дублирующихся узлов конечно-элементной сетки, критерием наступления которого является превышение величины пластической деформации критического значения:

$$\varepsilon_p > \varepsilon_{ppf}, \quad (7)$$

где ε_{ppf} – пластическая деформация разрушения, которая принята равной остаточной деформации образца при испытании на одноосное растяжение.

Неоднородность структуры материала моделируется путем задания нормального закона распределения для пластической деформации разрушения ε_{ppf} с помощью оригинального программного кода на языке "Python". Плотность вероятности описывается уравнением:

$$f(\varepsilon_{ppf}) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\varepsilon_{ppf} - \gamma)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (8)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение, γ – математическое ожидание, σ^2 – дисперсия распределения. В расчетах полагалось $\sigma = 0.05$, $\gamma = 0.35$.

Численное моделирование выполнено в отечественном пакете "ЛОГОС" разработки ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ" [24], в котором реализована конечно-элементная аппроксимация по пространству и конечно-разностная по времени. Дискретизация цилиндрической оболочки осуществлена с помощью четырехугольного конечного элемента типа Belytschko – Lin – Tsay с линейной аппроксимацией перемещений и углов поворота [25]. Он основан на теории Рейсснера – Миндлина и широко применяется для нелинейного анализа импульсно нагруженных тонкостенных конструкций с учетом больших деформаций. Интегрирование уравнений динамики осуществлено центрально-временной конечно-разностной схемой типа "КРЕСТ" [26]. Она имеет второй порядок точности и условно устойчива при выполнении условия Куранта – Фридрихса – Леви:

$$\tau \leq k \frac{a}{c}, \quad (9)$$

где τ – шаг по времени, k – число Куранта, a – характерный размер конечного элемента, c – скорость звука в среде. В расчетах было принято $k = 0.67$.

2. Результаты численного моделирования

2.1. Оценка влияния вероятностного критерия разрушения на фрагментацию

Исследование влияния вероятностного критерия разрушения узловых связей проведено путем сравнения результатов, полученных с использованием численных моделей с различными параметрами пластической деформации разрушения ε_{ppf} . В первой из них ε_{ppf} являлась постоянной величиной, равной математическому ожиданию γ . Во второй модели значение определялось по выражению (8) с учетом нормального распределения. Сравнительный анализ показал, что применение критерия разрушения, подчиненного нормальному закону, приводит к существенно неоднородному пространственно-массовому распределению фрагментов (рис. 2). Поле фрагментов, полученное по первой модели, демонстрирует однородный характер, что не согласуется с экспериментальными данными [27, 28].

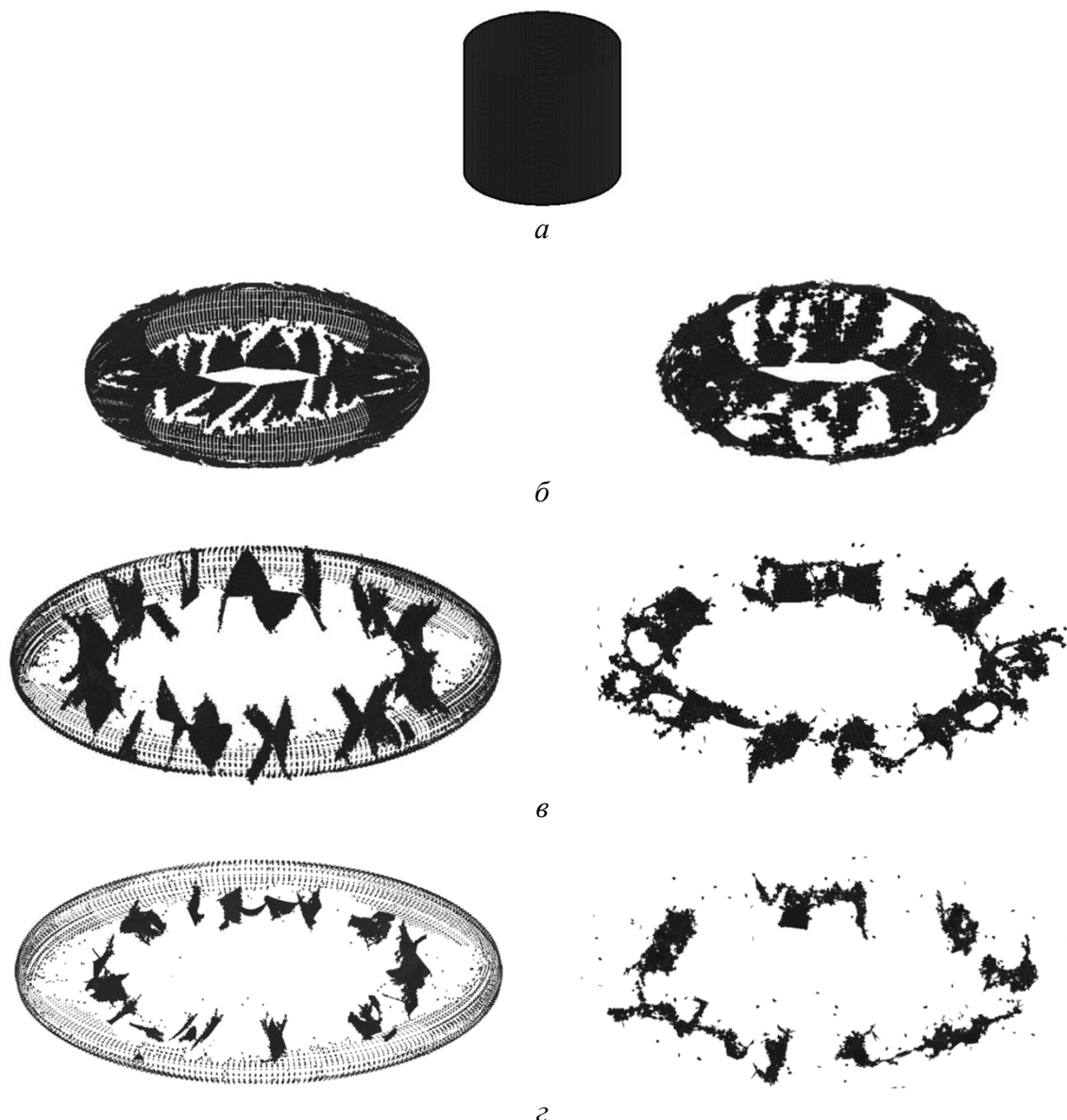


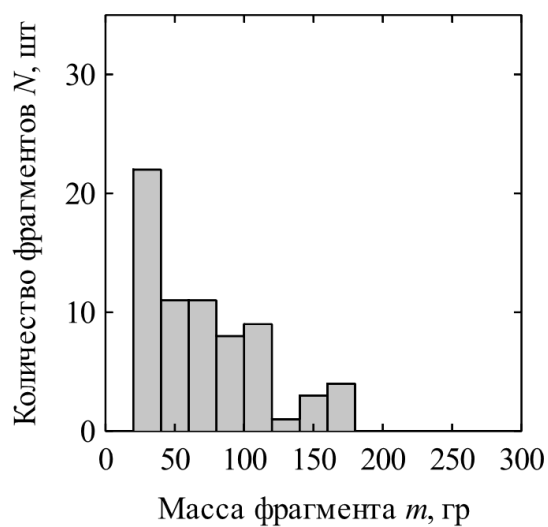
Рис. 2. Фрагментация цилиндрической оболочки с постоянным (слева) и вероятностным (справа) критерием разрушения в различные моменты времени:
 $a - t = 0.0$ мс, $б - t = 0.6$ мс, $в - t = 1.2$ мс, $г - t = 1.9$ мс

2.2. Оценка влияния дискретизации на фрагментацию оболочки

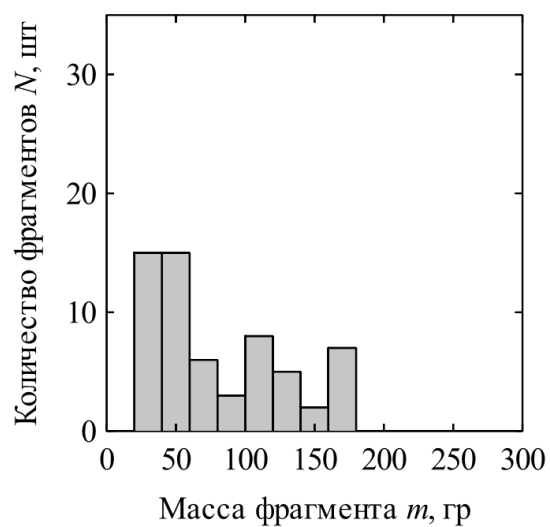
В данном разделе проанализировано влияние параметров конечно-элементной сетки на характеристики фрагментов. Рассмотрено четыре модели. При обработке результатов фрагменты, состоящие из одного конечного элемента, не учитывались в связи с их искажением в процессе расчета. Анализ полученных данных показал, что с увеличением количества конечных элементов значения характеристик изменяются непропорционально. При уменьшении размера элемента ниже определенной величины наблюдается скачкообразное изменение параметров фрагментов (табл. 1), однако их общий вид распределения по массовым группам с повышением степени дискретизации модели остается подобным друг другу (рис. 3). В частности, для всех расчетов наибольшее количество фрагментов расположено в диапазоне 20–40 гр.

Таблица 1. Параметры фрагментов при различной дискретизации модели

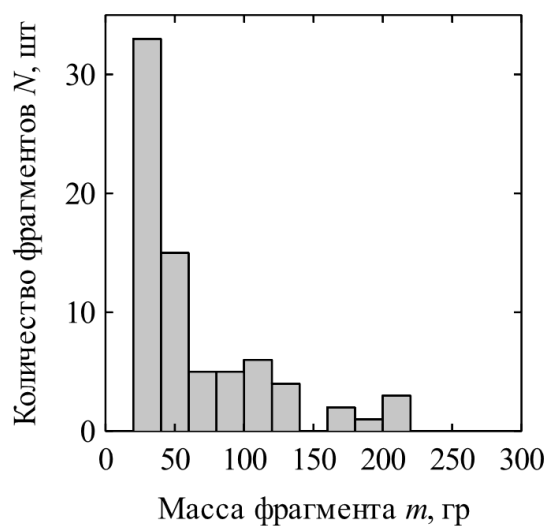
№	Число КЭ, шт.	Размер стороны КЭ, мм	Масса одного КЭ $m_{кэ}$, гр.	Общее количество фрагментов, шт.	Средняя масса фрагмента, гр.	Минимальная масса фрагмента, гр.	Максимальная масса фрагмента, гр.
1	6776	7.9	0.83	85	60.41	20	166
2	9964	6.5	0.56	87	62.07	28	171
3	15074	5.3	0.37	107	49.81	18	215
4	20944	4.5	0.26	102	49.27	16	248



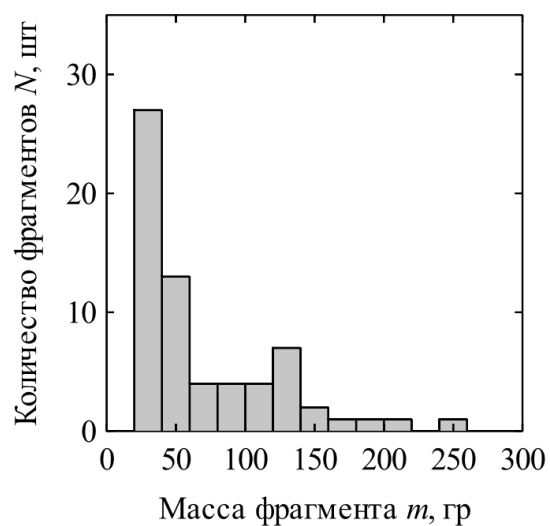
а



б



в



г

Рис. 3. Гистограммы распределения фрагментов по массе при различной дискретизации: а) $m_{кэ} = 0.83$ гр, б) $m_{кэ} = 0.56$ гр, в) $m_{кэ} = 0.37$ гр, г) $m_{кэ} = 0.26$ гр

2.3. Сравнение результатов расчета фрагментации оболочки с экспериментом

С целью сравнения с экспериментальными данными на конечно-элементной сетке № 4 была проведена серия из десяти расчетов для сбора статистики. В каждом из них критерий разрушения заново устанавливался с помощью разработанного алгоритма. Анализ полученных распределений долей массовых групп по отношению к учтенной массе модели показал, что результаты численного моделирования качественно согласуются с экспериментальными данными, полученными в работе [29] при проведении взрывных испытаний открытого цилиндра (рис. 4), где $m_{\text{мг}}$ – масса массовой группы, $m_{\text{к}}$ – учтенная масса фрагментов.

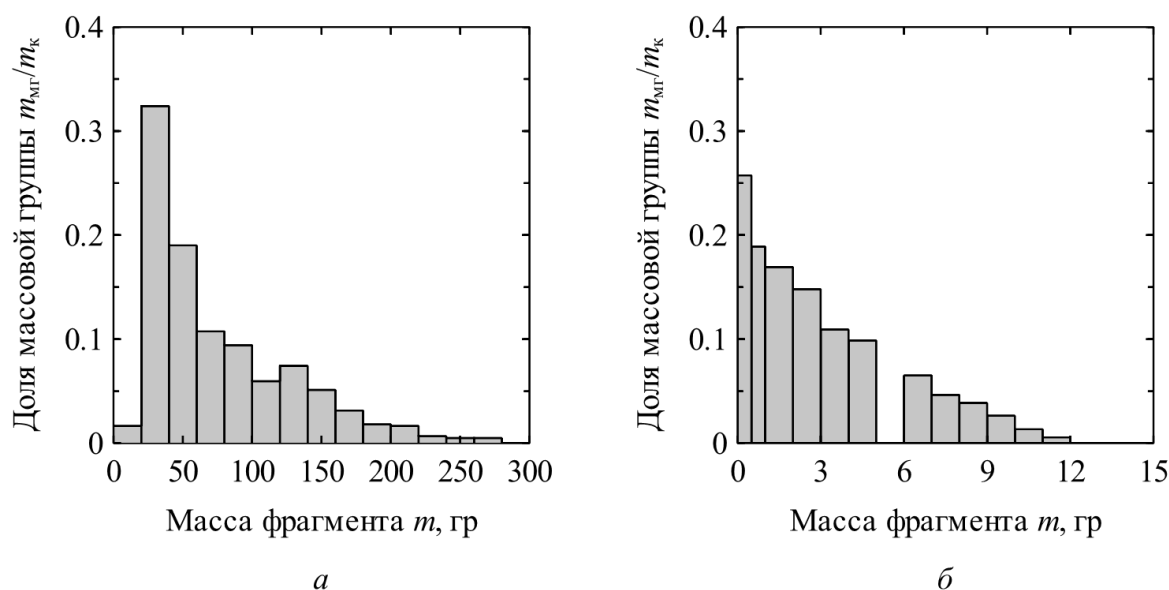


Рис. 4. Гистограммы распределения фрагментов по массовым группам в виде "масса по массе": а) результат численного моделирования, б) результат эксперимента

Заключение

Рассмотрены некоторые аспекты численного моделирования процесса разрушения упругопластической тонкостенной цилиндрической оболочки при возникновении взрыва внутри конструкции. Результаты расчетов и отработанная методика их проведения имеют возможность практического применения в нефтегазовой отрасли для оценки последствий и повышения защищенности людей и объектов в случае наступления чрезвычайной ситуации.

Продемонстрирована необходимость учета неоднородной структуры материала для корректного описания картины фрагментации, качественно согласующейся с экспериментальными данными. Исследовано влияние степени дискретизации расчетной области на характеристики поля фрагментов и их распределения по массовым группам. Скачкообразное изменение этих параметров, наблюдаемое с ростом количества конечных элементов при превышении их некоторого критического значения, приводит к необходимости разработки требований к степени дискретизации модели, основанных на анализе экспериментальных данных.

Список источников

1. Taiwo B. O., Gebretsadik A., Abbas H. H., Khishe M., Fisssha Y., Kahraman E., Rab-bani A., Akinlabi A. A. Explosive utilization efficiency enhancement: An application of machine learning for powder factor prediction using critical rock characteristics // *Heliyon*. 2024. Vol. 10, № 12. e33099.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33099> (дата обращения: 10.07.2024).
2. Sherpa B. B., Rani R. Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review // *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*. 2024. Vol. 6. 100078. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jalmes.2024.100078> (дата обращения: 10.07.2024).
3. Isobe D., Jiang R. Explosive demolition planning of building structures using key element index // *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 59. 104935. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104935> (дата обращения: 10.07.2024).
4. Miętkiewicz R. High explosive unexploded ordnance neutralization - Tallboy air bomb case study // *Defence Technology*. 2022. Vol. 18, № 3. P. 524–535. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2021.03.011> (дата обращения: 10.07.2024).
5. Osnes K., Dey S., Hopperstad O. S., Børvik T. On the Dynamic Response of Laminated Glass Exposed to Impact Before Blast Loading // *Experimental Mechanics*. 2019. Vol. 59, № 7. P. 1033–1046. URL: <https://doi.org/10.1007/s11340-019-00496-1> (дата обращения: 10.07.2024).
6. Song S., Wang C., Qiao B., Gu G. Explosion damage effects of aviation kerosene storage tank under strong ignition // *Defence Technology*. 2024. Vol. 37. P. 27–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.12.009> (дата обращения: 10.07.2024).
7. Zhang Z., Zhang Z., Huang X. Experimental study on the impact response of the polyurea-coated 3D auxetic lattice sandwich panels subjected to air explosion // *Composite Structures*. 2023. Vol. 323. 117500.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117500> (дата обращения: 10.07.2024).
8. Hou L., Li Y., Qian X., Shu C., Yuan M., Duanmu W. Large-scale experimental investigation of the effects of gas explosions in underdrains // *Journal of Safety Science and Resilience*. 2021. Vol. 2, № 2. P. 90–99.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnlssr.2021.03.001> (дата обращения: 10.07.2024).
9. Osnes K., Holmen J. K., Hopperstad O. S., Børvik T. Fracture and fragmentation of blast-loaded laminated glass: An experimental and numerical study // *International Journal of Impact Engineering*. 2019. Vol. 132. 103334.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103334> (дата обращения: 10.07.2024).
10. Вильдеман В. Э., Феклистова Е. В., Мугатаров А. И., Муллахметов М. Н., Кучуков А. М. Аспекты численного моделирования процессов разрушения упруго-хрупких тел // *Вычислительная Механика Сплошных Сред*. 2023. Т. 16, № 4. С. 420–429. URL: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2023.16.4.35> (дата обращения: 10.07.2024).
11. Li M., Zhu Z., Liu R., Liu B., Zhou L., Dong Y. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018. Vol. 103. P. 186–194.
URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.01.043> (дата обращения: 10.07.2024).

12. Tian S., Yan Q., Du X., Chen F., Zhang B. Experimental and numerical studies on the dynamic response of precast concrete slabs under blast load // *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 70. 106425. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106425> (дата обращения: 10.07.2024).
13. Qi S., Zhi X., Fan F., Flay R.G.J. Probabilistic blast load model for domes under external surface burst explosions // *Structural Safety*. 2020. Vol. 87. 102004. URL: <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2020.102004> (дата обращения: 10.07.2024).
14. Zhou L., Li X., Yan Q. Dynamic response and vulnerability analysis of pier under near-field underwater explosion // *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 155. 107749. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107749> (дата обращения: 10.07.2024).
15. Gan N., Liu L. T., Yao X. L., Wang J. X., Wu W. B. Experimental and numerical investigation on the dynamic response of a simplified open floating slender structure subjected to underwater explosion bubble // *Ocean Engineering*. 2021. Vol. 219. 108308. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108308> (дата обращения: 10.07.2024).
16. He Z., Du Z., Zhang L., Li Y. Damage mechanisms of full-scale ship under near-field underwater explosion // *Thin-Walled Structures*. 2023. Vol. 189. 110872. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110872> (дата обращения: 10.07.2024).
17. Kishore K. B., Gangolu J., Ramancha M. K., Bhuyan K., Sharma H. Performance-based probabilistic deflection capacity models and fragility estimation for reinforced concrete column and beam subjected to blast loading // *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 227. 108729. URL: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108729> (дата обращения: 10.07.2024).
18. Huang X., Yue Y., Zhu B., Chen Y. Failure analysis of underground concrete silo under near-field soil explosion // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. Vol. 147. 105696. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105696> (дата обращения: 10.07.2024).
19. Zhou X.-Q., Huang B.-G., Wang X.-Y., Xia Y. Deep learning-based prediction of structural responses of RC slabs subjected to blast loading // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 311. 118184. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118184> (дата обращения: 10.07.2024).
20. Widanage C., Mohotti D., Lee C. K., Wijesooriya K., Meddage, D. P. P. Use of explainable machine learning models in blast load prediction // *Engineering Structures*. 2024. Vol. 312. 118271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118271> (дата обращения: 10.07.2024).
21. Zhang H., Xu Y., Xiao L., Zhen C. Physics-informed machine learning model for prediction of ground reflected wave peak overpressure // *Defence Technology*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.06.004> (дата обращения: 10.07.2024).
22. Singh K., Gardoni P., Stochino F. Probabilistic models for blast parameters and fragility estimates of steel columns subject to blast loads // *Engineering Structures*. 2020. Vol. 222. 110944. URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110944> (дата обращения: 10.07.2024).
23. Randers-Pehrson G., Bannister K. A. Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D. U.S. Army Research Laboratory. 1997.
24. Пакет программ "ЛОГОС" [Электронный ресурс]. URL: <http://logos.vniief.ru/> (дата обращения: 10.07.2024)

25. Belytschko T., Lin J. I., Tsay C.-S. Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1984. Vol. 42, №2. P. 225–251. URL: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(84\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0045-7825(84)90026-4) (дата обращения: 10.07.2024).
26. Hughes T. J. R., Liu W. K. Nonlinear finite element analysis of shells-part II. two-dimensional shells // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 1981. Vol. 27, № 2. P. 167–181. URL: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(81\)90148-1](https://doi.org/10.1016/0045-7825(81)90148-1) (дата обращения: 10.07.2024).
27. Wang K., Chen P., Sun X., Liu Y., Meng J., Li X., Zheng X., Xiao C. Fracture behavior and mechanism of highly fragmented steel cylindrical shell under explosive loading // *Defence Technology*. 2024. Vol. 36. P. 122–132. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2024.02.004> (дата обращения: 10.07.2024).
28. An X., Ye P., Liu J., Tian C., Feng S., Dong Y. Dynamic fracture and fragmentation characteristics of metal cylinder and rings subjected to internal explosive loading // *Materials*. 2020. Vol. 13, № 3. 778. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13030778> (дата обращения: 10.07.2024).
29. *Физика взрыва* / под ред.: Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004. Т. 2. 656 с.

References

1. Taiwo, B.O., Gebretsadik, A., Abbas, H.H., Khishe, M., Fissaha, Y., Kahraman E., Rabhani A. and Akinlabi A.A. (2024) "Explosive utilization efficiency enhancement: An application of machine learning for powder factor prediction using critical rock characteristics", *Heliyon*, vol. 10, no. 12, e33099.
2. Sherpa, B.B. and Rani, R. (2024), "Advancements in explosive welding process for bimetallic material joining: A review", *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, vol. 6, 100078.
3. Isobe, D. and Jiang, R. (2022), "Explosive demolition planning of building structures using key element index", *Journal of Building Engineering*, vol. 59, 104935.
4. Miętkiewicz, R. (2022), "High explosive unexploded ordnance neutralization - Tallboy air bomb case study", *Defence Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 524–535.
5. Osnes, K., Dey, S., Hopperstad, O.S. and Børvik, T. (2019) "On the Dynamic Response of Laminated Glass Exposed to Impact Before Blast Loading", *Experimental Mechanics*, vol. 59, no. 7, pp. 1033–1046.
6. Song, S., Wang, C., Qiao, B. and Gu, G. (2024), "Explosion damage effects of aviation kerosene storage tank under strong ignition", *Defence Technology*, vol. 37, pp. 27–38.
7. Zhang, Z., Zhang Z. and Huang, X. (2023), "Experimental study on the impact response of the polyurea-coated 3D auxetic lattice sandwich panels subjected to air explosion", *Composite Structures*, vol. 323, 117500.
8. Hou, L., Li, Y., Qian, X., Shu, C., Yuan, M. and Duanmu, W. (2021), "Large-scale experimental investigation of the effects of gas explosions in underdrains", *Journal of Safety Science and Resilience*, vol. 2, no. 2, pp. 90–99.
9. Osnes, K., Holmen, J.K., Hopperstad, O.S. and Børvik, T. (2019), "Fracture and fragmentation of blast-loaded laminated glass: An experimental and numerical study", *International Journal of Impact Engineering*, vol. 132, 103334.

10. Wildemann, V.E., Feklistova, E.V., Mugatarov, A.I., Mullahmetov M.N. and Kuchukov, A.M. (2023), "Aspects of numerical simulation of failure of elastic-brittle solids", *Computational Continuum Mechanics*, vol. 16, no. 4, pp. 420–429.
11. Li, M., Zhu Z., Liu, R., Liu, B., Zhou, L. and Dong, Y. (2018), "Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 103, pp. 186–194.
12. Tian, S., Yan, Q., Du, X., Chen, F. and Zhang, B. (2023), "Experimental and numerical studies on the dynamic response of precast concrete slabs under blast load", *Journal of Building Engineering*, vol. 70, 106425.
13. Qi, S., Zhi, X., Fan, F. and Flay, R.G.J. (2020), "Probabilistic blast load model for domes under external surface burst explosions", *Structural Safety*, vol. 87, 102004.
14. Zhou L., Li X. and Yan Q. (2024), "Dynamic response and vulnerability analysis of pier under near-field underwater explosion", *Engineering Failure Analysis*, vol. 155, 107749.
15. Gan, N., Liu, L.T., Yao, X.L., Wang, J.X. and Wu, W.B. (2021), "Experimental and numerical investigation on the dynamic response of a simplified open floating slender structure subjected to underwater explosion bubble", *Ocean Engineering*, vol. 219, 108308.
16. He Z., Du, Z., Zhang, L. and Li, Y. (2023), "Damage mechanisms of full-scale ship under near-field underwater explosion", *Thin-Walled Structures*, vol. 189, 110872.
17. Kishore, K.B., Gangolu, J., Ramancha, M.K., Bhuyan, K. and Sharma, H. (2022), "Performance-based probabilistic deflection capacity models and fragility estimation for reinforced concrete column and beam subjected to blast loading", *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 227, 108729.
18. Huang, X., Yue, Y., Zhu, B. and Chen, Y. (2024), "Failure analysis of underground concrete silo under near-field soil explosion", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 147, 105696.
19. Zhou, X.-Q., Huang, B.-G., Wang, X.-Y. and Xia, Y. (2024), "Deep learning-based prediction of structural responses of RC slabs subjected to blast loading", *Engineering Structures*, vol. 311, 118184.
20. Widanage, C., Mohotti, D., Lee, C.K., Wijesooriya, K. and Meddage, D.P.P. (2024), "Use of explainable machine learning models in blast load prediction", *Engineering Structures*, vol. 312, 118271.
21. Zhang, H., Xu, Y., Xiao, L. and Zhen, C. (2024), "Physics-informed machine learning model for prediction of ground reflected wave peak overpressure", *Defence Technology*, In Press.
22. Singh K., Gardoni, P. and Stochino, F. (2020), "Probabilistic models for blast parameters and fragility estimates of steel columns subject to blast loads", *Engineering Structures*, vol. 222, 110944.
23. Randers-Pehrson, G. and Bannister, K.A. (1997), "Airblast Loading Model for DYNA2D and DYNA3D", *Army Research Laboratory*.
24. "LOGOS" software [Electronic resource]. URL: <http://logos.vniief.ru/> (accessed 10 July 2024).
25. Belytschko, T., Lin, J.I. and Tsay, C.-S. (1984), "Explicit algorithms for the nonlinear dynamics of shells", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 225–251.

26. Hughes, T.J.R. and Liu, W.K. (1981), "Nonlinear finite element analysis of shells-part II. two-dimensional shells", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 27, no. 2, pp. 167–181.
27. Wang, K., Chen, P., Sun, X., Liu, Y., Meng, J., Li, X., Zheng, X. and Xiao, C. (2024), "Fracture behavior and mechanism of highly fragmented steel cylindrical shell under explosive loading", *Defence Technology*, vol. 36, pp. 122–132.
28. An, X., Ye, P., Liu, J., Tian, C., Feng, S. and Dong, Y. (2020), "Dynamic fracture and fragmentation characteristics of metal cylinder and rings subjected to internal explosive loading", *Materials*, vol. 13, no. 3, 778.
29. Orlenko, L.P. (ed.) (2004), *Fizika vzryva [Physics of explosion]*, FIZMATLIT, Moscow, Russian Federation.

Информация об авторах:

С. М. Герцик – главный специалист по учебно-методической работе Центра компетенций и обучения (607182, Нижегородская обл., г. Саров, ул. Парковая, 1 стр. 3, помещ. 36), Scopus Author ID: 57223340179;

В. А. Конюхов – инженер-исследователь Института механики сплошных сред УрО РАН (614068, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), WoS Researcher ID: JOJ-9991-2023;

С. В. Лекомцев – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией механики функциональных материалов Института механики сплошных сред УрО РАН (614068, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1), WoS Researcher ID: F-3528-2018, Scopus Author ID: 56155162000, РИНЦ Author ID: 671355.

Information about the authors:

S. M. Gertsik – leading specialist in educational and methodological work of the Competence and Training Center (1, building 3, Parkovaya St., Nizhny Novgorod region, Sarov, Russia, 6607182), Scopus Author ID: 57223340179;

V. A. Koniukhov – research engineer, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academica Koroleva St., Perm, Russia, 614068), WoS Researcher ID: JOJ-9991-2023;

S. V. Lekomtsev – Ph. D., head of the Laboratory of Functional Materials Mechanics, Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (1, Academica Koroleva St., Perm, Russia, 614068), WoS Researcher ID: F-3528-2018, Scopus Author ID: 56155162000, РИНЦ Author ID: 671355.