

Моделирование процесса кумуляции для определения толщины и прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора, обеспечивающего максимальную глубину пробития

А.Р. Мухутдинов¹, З.Р. Вахидова², М.Г. Ефимов¹✉

¹Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация

²Университет управления «ТИСБИ», г. Казань, Российская Федерация

✉jero07@bk.ru

Резюме

На нефтяных скважинах широко применяется энергия взрыва в виде кумулятивной струи, которая пробивает канал. При прострелочно-взрывных работах на нефтяных скважинах находят применение перфораторы на основе кумулятивных зарядов с сегментной облицовкой. Однако проведение прострелочно-взрывных работ – процесс дорогостоящий и опасный. Поэтому перспективным является его компьютерное моделирование, более дешевое и безопасное по сравнению с натурным экспериментом. Так, для моделирования процесса, характеризуемого малым временем протекания, большими деформациями и перемещениями, частичным или полным разрушением материала, перспективно использовать прикладное программное обеспечение ANSYS AUTODYN. В данной статье описывается разработанная и отработанная методика создания компьютерной модели для точного определения пробивного действия кумулятивного заряда перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности с сегментной облицовкой по глубине канала в стальной плите. Проведен виртуальный эксперимент с моделью кумулятивного заряда перфоратора для изучения направленного действия взрыва. Представлено сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента пробивной способности кумулятивных зарядов. С помощью вычислительных экспериментов установлено влияние прогиба и толщины облицовки на глубину пробития. В ходе вычислительного эксперимента для заряда перфоратора найдены эффективные значения толщины и прогиба сегментной облицовки кумулятивного заряда перфоратора.

Ключевые слова

компьютерное моделирование, кумулятивный заряд с сегментной облицовкой, глубина пробития, толщина медной облицовки

Для цитирования

Мухутдинов А.Р. Моделирование процесса кумуляции для определения толщины и прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора, обеспечивающего максимальную глубину пробития / А.Р. Мухутдинов, З.Р. Вахидова, М.Г. Ефимов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2023. № 3(79). С. 172–180. DOI 10.26731/1813-9108.2023.3(79).172-180.

Информация о статье

поступила в редакцию: 07.02.2023 г.; поступила после рецензирования: 11.09.2023 г.; принята к публикации: 12.09.2023 г.

Simulation of the cumulation process to determine the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator charge, providing maximum penetration depth

A.R. Mukhutdinov¹, Z.R. Vakhidova², M.G. Efimov¹✉

¹Kazan National Research Technological University, Kazan, the Russian Federation

²University of Management «TISBI», Kazan, the Russian Federation

✉jero07@bk.ru

Abstract

In oil wells, explosive energy is widely used in the form of a cumulative jet that breaks through a channel. For perforation and blasting operations in oil wells, perforators based on shaped charges with segmental cladding are used. However, carrying out perforation and blasting operations is expensive and dangerous. Therefore, it is promising to carry out computer modeling of the cumulation process, which is cheaper and safer as compared to a full-scale experiment. Thus, to simulate a process characterized by short flow times, large deformations and displacements, partial or complete destruction of the material, it is promising to use the ANSYS AUTODYN applied software. This article, using modern information technologies (in ANSYS AUTODYN applied software), presents a developed and tested methodology for creating a computer model for accurate determining of breakdown effect of the cumulative charge of a perforator made of a mixed energy-saturated material of high power with segmental cladding along the depth of the channel in steel plate. A virtual experiment was carried out with a model of a shaped charge of a perforator to study the directional

effect of an explosion. A comparative study of the results of computer modeling and a full-scale experiment on the penetration ability of shaped charges is presented. Using computational experiments, the influence of deflection and lining thickness on the penetration depth was established. During a computational experiment for a perforator charge, the effective values of the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator shaped charge were found.

Keywords

computer simulation, shaped charge with segmental lining, penetration depth, copper lining thickness

For citation

Mukhutdinov A.R., Vakhidova Z.R., Efimov M.G. Modelirovanie protsessa kumulyatsii dlya opredeleniya tolshchiny i progiba segmentnoi oblitsovki zaryada perforatora, obespechivayushchego maksimal'nyu glubinu probitiya [Simulation of the cumulation process to determine the thickness and deflection of the segmental cladding of the perforator charge, providing maximum penetration depth]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2023, no. 3(79), pp. 172–180. DOI: 10.26731/1813-9108.2023.3(79).172-180.

Article Info

Received: February 7, 2023; Revised: September 11, 2023; Accepted: September 12, 2023.

Введение

На нефтяных промыслах широко применяется энергия взрыва в виде кумулятивной струи, которая пробивает канал. При прострелочно-взрывных работах на нефтяных скважинах находят применение перфораторы на основе кумулятивных зарядов (КЗ) с сегментной облицовкой [1–3]. Проблемой компьютерного моделирования процесса кумуляции занимаются многие исследователи [1–18], однако мало изучено моделирование процесса кумуляции зарядов с сегментной облицовкой. Следует отметить, что преимущество использования компьютерного моделирования процесса кумуляции заключается в его наглядности, дешевизне и безопасности. Поэтому изучение возможности применения компьютерных технологий для точного моделирования процесса кумуляции зарядов с сегментной облицовкой является актуальной задачей, имеющей научный и практический интерес. Научные исследования проводятся с применением информационных технологий [10–18] на образцах при ограниченном размере и весе. Их эффективность оценивается величиной пробивного действия. Развитие прикладных программных средств для моделирования быстропротекающих процессов способствует применению вычислительного эксперимента для определения максимального пробивного действия КЗ. Так, для моделирования процесса, характеризуемого малым временем протекания, большими деформациями и перемещениями, частичным или полным разрушением материала, перспективно использовать прикладное программное обеспечение (ППО) ANSYS AUTODYN [6–9].

Задачей данной работы является изучение моделирования в ППО ANSYS AUTODYN влияния на глубину пробития КЗ толщины медной сегментной облицовки. Оценка влияния на глубину пробития КЗ толщины медной сегментной облицовки проводилась в ходе работы на компьютерных моделях процесса кумуляции зарядов перфораторов.

Методика и объект исследования

Целью данной работы является моделирование процесса кумуляции КЗ перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности типа А1 (СЭМПМтА1) с сегментной облицовкой (КЗПсСО) для определения влияния толщины медной сегментной облицовки на глубину пробития.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать современное состояние применения компьютерного моделирования КЗ перфораторов в научной литературе.
2. Разработать компьютерную модель КЗ перфоратора с сегментной облицовкой.
3. Провести виртуальный эксперимент с моделью КЗ перфоратора для изучения направленного действия взрыва.
4. Провести сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента по определению пробивной способности КЗ.

Объектом исследования является процесс кумуляции КЗПсСО из СЭМПМтА1 [19] в перфораторах. Предлагаемая методика включает следующие этапы:

1. Запуск ППО ANSYS AUTODYN.
2. Создание компьютерной модели.

3. Выбор материалов, которые будут использоваться в построении модели.

4. Определение значения плотности СЭМПМтА1. Изменение модели эрозии материалов.

5. Создание начальных граничных условий для воздуха.

6. Создание конечных граничных условий.

7. Создание Лагранжевой части для стальной плиты.

8. Создание Эйлеровой части для воздуха, взрывчатого вещества и облицовки.

9. Создание геометрической модели КЗ.

10. Создание Эйлеровой части для взрыва.

11. Определение условий оттока Эйлеровой части для взрыва за границы модели.

12. Установление Лагранж-Лагранж взаимодействия.

13. Установление Эйлер-Лагранж-взаимодействия.

14. Установление точки детонации.

15. Определение контроля решений (для всех моделей количество циклов – 10 000).

16. Определение выходных параметров.

17. Настройка отображений модели.

18. Проведение расчета пробивного действия КЗ. Оценка полученного значения.

19. Создание GIF-анимации решенной задачи (Graphics Interchange Format – формат для обмена изображениями).

Построение модели осуществлялось в двумерной постановке, симметрия – осевая. Численное интегрирование уравнений совместно с определяющими соотношениями для материалов при соответствующих начальных и граничных условиях выполнялось на эйлеровой сетке – для воздуха и СЭМПМтА1, а на лагранжевой сетке – для стальной плиты. Пространственное разрешение составляло три ячейки на 1 мм для эйлеровых частей модели, а для лагранжевой части – одна ячейка к 1 мм. СЭМПМтА1 и материал для облицовки и плиты выбирались из стандартной библиотеки программы.

При создании компьютерной модели кумулятивного действия взрыва использовались уравнения:

1. Для СЭМПМтА1 (обозначение в программе А1) – уравнение Джонса – Уилкинса – Ли (JWL), которое описывает состояние и поведение продуктов детонации.

2. Для воздуха (в программе AIR) – урав-

нение идеального газа (Ideal Gas), описывающее зависимость между давлением, объемом и абсолютной температурой газа. Внутренняя энергия начального условия для воздуха задавалась $2,068 \cdot 10^5$ Дж/кг, чтобы инициализировать его с давлением в одну атмосферу. Следует отметить, что для СЭМПМтА1 и воздуха нет моделей прочности.

3. Для меди (в программе Copper) – уравнение полиномиальное (Polynomial), которое описывает его состояние и поведение.

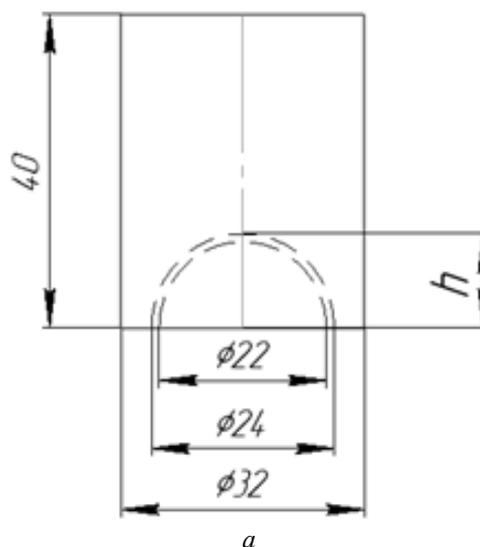
4. Для стали (в программе STEEL 1006) – уравнение ударной адиабаты (Shock), которое описывает процесс взаимодействия.

При учете прочности при взаимодействии сред использовались следующие модели: Джонсона – Кука для стали (STEEL 1006) и Джонсона – Холмквиста для меди (Copper).

На левой, правой и верхней границах модели устанавливались граничные условия Flow Out (в программе Euler), определяющие возможность свободного течения веществ изнутри за пределы расчетного поля без каких-либо отражений от границ.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В работе рассматривается цилиндрический кумулятивный заряд с сегментной медной облицовкой, изготовленный методом глухого прессования из вещества типа А1. Диаметр заряда – 32 мм, высота – 40 мм, плотность – $1,60$ г/см³. Исследуемая толщина облицовки 0,3–1,1 мм, диаметр основания облицовки – 24 мм, прогиб облицовки h – 0,41–0,45 (рис. 1).



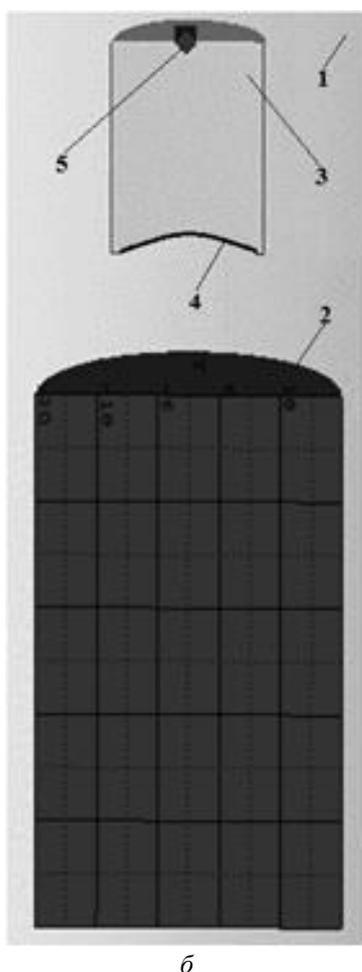


Рис. 1. Чертеж кумулятивного заряда с сегментной облицовкой (а) и схема виртуальных испытаний (б): 1 – воздух; 2 – стальная пластина; 3 – кумулятивный заряд перфоратора; 4 – сегментная медная облицовка; 5 – точка инициирования заряда

Fig. 1. Drawing of a shaped charge with segmental cladding (a) and the scheme of virtual tests (b): 1 – air; 2 – steel plate; 3 – cumulative charge of the perforator; 4 – segmented copper cladding; 5 – charge initiation point

Пробивную способность заряда определяют, оценивая глубину и диаметр входного отверстия в преграде. В качестве материала для преграды использовались металлические пластины марки Сталь 3 (Ст3). Эта марка относится к стали конструкционной углеродистой обыкновенного качества. Химический состав стали Ст3 по ГОСТ 380-2005 [20].

Изучение величины прогиба проводили в несколько этапов: грубое определение экстремумов выходных параметров, сужение диапа-

зона поиска и определение его эффективного значения. На первом этапе провели определение экстремумов выходных параметров, т.е. зависимости глубины пробития ($Y1$) от прогиба медной облицовки толщиной 1 мм. Результаты представлены на рис. 2.

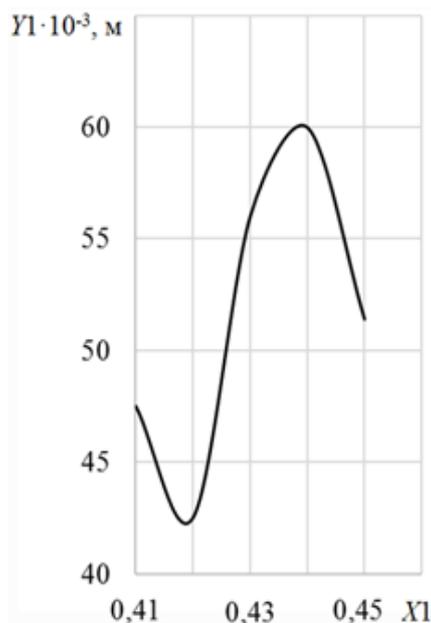
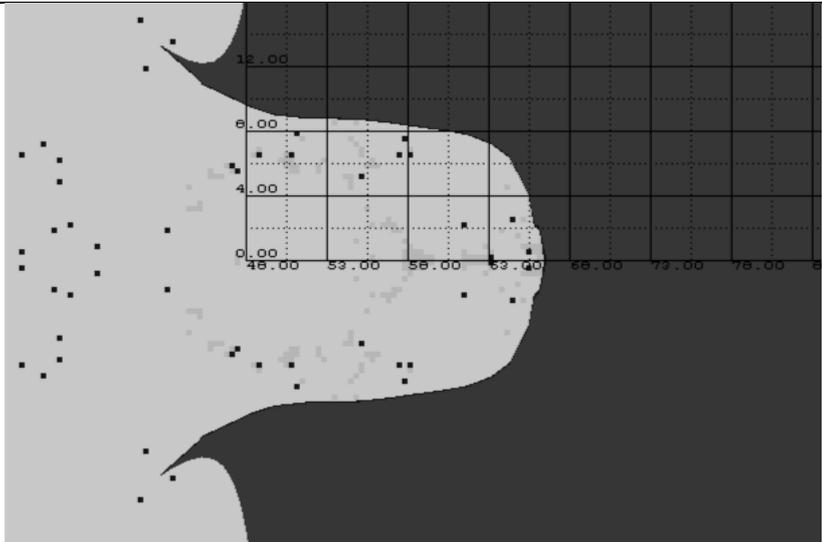
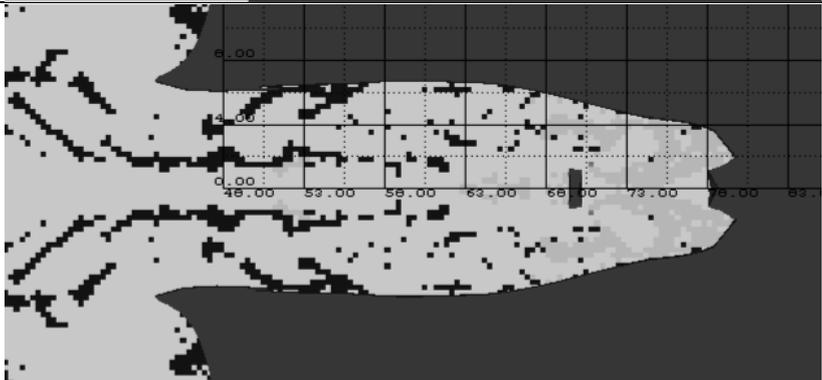
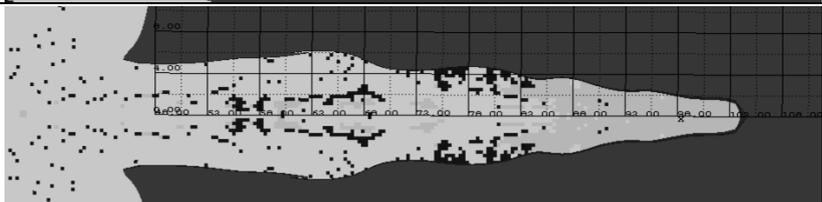
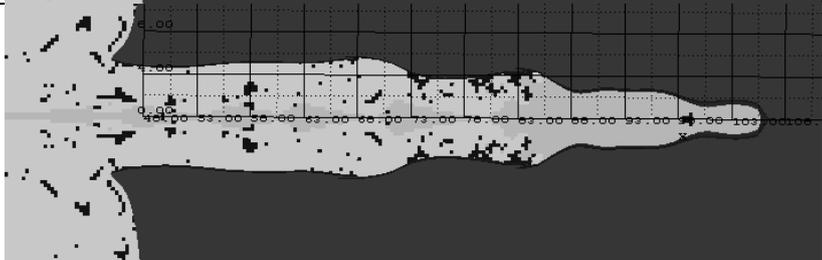


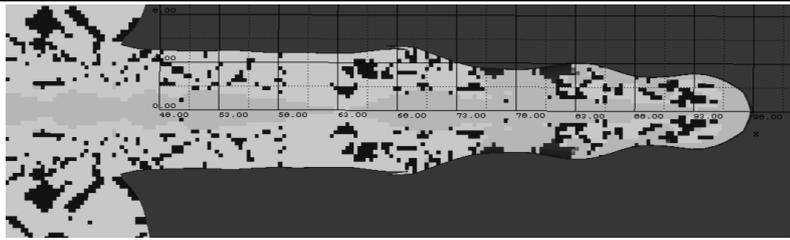
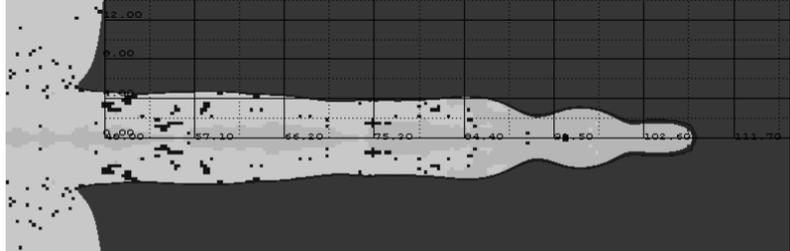
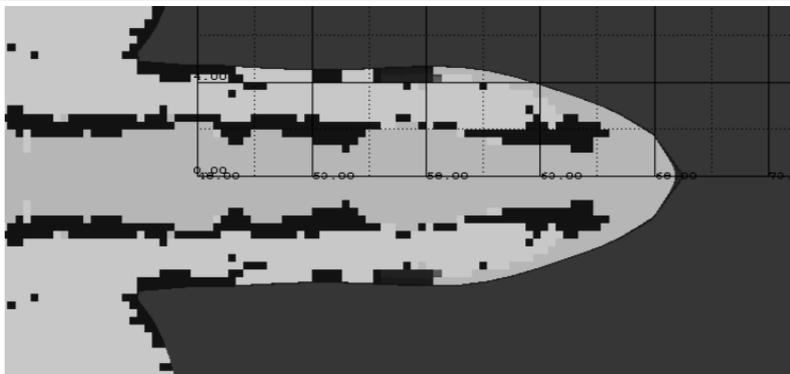
Рис. 2. График зависимости глубины пробития ($Y1$) от прогиба ($X1$) медной облицовки толщиной 1 мм
Fig. 2. Graph of penetration depth ($Y1$) versus deflection ($X1$) of 1 mm thick copper cladding

На графике видно, что при прочих равных параметрах зарядов с увеличением прогиба сегментной облицовки в диапазоне от 0,41 до 0,45 максимальная глубина пробития достигается при прогибе 0,44. При дальнейшем увеличении прогиба глубина пробития резко уменьшается. Проанализировав полученные результаты, определяем предпочтительную величину прогиба сегментной медной облицовки – 0,44.

На втором этапе проводим определение предпочтительного значения толщины медной облицовки с прогибом 0,44. Данные, полученные путем компьютерного моделирования процесса кумуляции, представлены в табл. 1. По ним построен график зависимости глубины пробития ($Y1$) и диаметра входного отверстия ($Y2$) от толщины медной облицовки ($X2$) с изгибом 0,44 (рис. 3).

Таблица 1. Результаты моделирования пробития преграды зарядами с медной сегментной облицовкой различной толщины и прогибом 0,44
Table 1. The results of modeling the penetration of an obstacle by charges with a copper segmental cladding of various thicknesses and a deflection of 0,44

Толщина, м	Форма пробития	Глубина пробития, м	Диаметр входного отверстия, м
$\times 2 \cdot 10^{-3}$		$Y1 \cdot 10^{-3}$	$Y2 \cdot 10^{-3}$
0,3		18,75	25
0,5		31,25	14
0,7		56,25	13
0,8		58,75	12

0,9		50,0	12
1		60,0	12
1,1		22	12

Из графика делаем следующие выводы:

1. Глубина пробития стальной преграды зарядом, имеющим сегментную облицовку изгибом 0,44, зависит от толщины этой облицовки.

2. При изменении толщины облицовки 0,3–0,8 мм наблюдается увеличение глубины пробития до 58,75 мм.

3. При толщине облицовки 0,9 мм глубина пробития уменьшается до 50,0 мм. При тол-

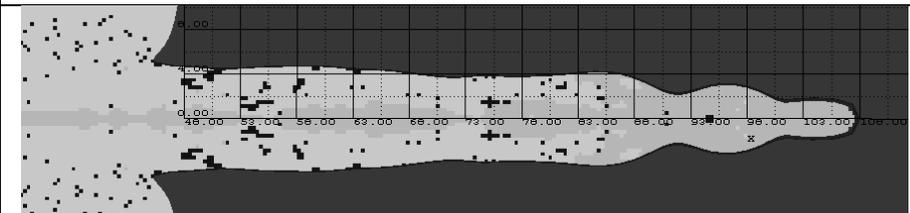
щине 1 мм значение глубины пробития максимально и равно 60,0 мм.

4. Далее увеличение толщины медной облицовки ведет к резкому уменьшению пробивной способности заряда.

Проверим достоверность полученного результата ППО ANSYS AUTODYN на трех параллельных испытаниях. Результаты моделирования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты моделирования пробития преграды зарядами с медной сегментной облицовкой толщиной 1 мм и изгибом 0,44

Table 2. The results of modeling the penetration of an obstacle by charges with a copper segmental cladding 1 mm thick and a bend of 0,44

Форма пробития	Глубина пробития, м	Диаметр входного отверстия, м
	$Y1 \cdot 10^{-3}$	$Y2 \cdot 10^{-3}$
	60,0	12
	60,0	12
	60,0	12

Результаты трехкратного проведения компьютерного расчета показали, что полученный результат не является случайным.

Таким образом, в ходе вычислительного эксперимента для заряда перфоратора (диаметр d_3 – 32 мм, высота – 40 мм, плотность вещества типа А1 – 1,60 г/см³, диаметр основания облицовки – 24 мм, фокусное расстояние – $1,5 \cdot d_3$) найдены предпочтительные эксплуатационные параметры сегментной облицовки: толщина 1 мм при изгибе 0,44.

Заключение

1. Использование компьютерного моделирования на основе современных информационных технологий для изучения процесса кумуляции при прострелочно-взрывных работах в нефтяных скважинах является актуальным.

2. Отработана методика создания компьютерной модели для точного определения про-

бивного действия КЗ перфоратора из смесового энергонасыщенного материала повышенной мощности типа А1 с сегментной облицовкой по глубине канала в стальной плите.

3. Отработана методика создания компьютерной модели КЗ перфоратора с сегментной облицовкой. Проведен виртуальный эксперимент с моделью КЗ перфоратора для изучения направленного действия взрыва. Представлено сравнительное изучение результатов компьютерного моделирования и натурального эксперимента пробивной способности КЗ.

4. С помощью вычислительных экспериментов установлено влияние прогиба и толщины облицовки на глубину пробития. Определены предпочтительные значения прогиба и толщины сегментной облицовки кумулятивного заряда перфоратора.

Список литературы

1. Попов В.В. Прострелочно-взрывные работы в скважинах. Новочеркасск : ЮРГТУ, 2007. 213 с.
2. Кумуляция и ее использование во взрывной технике / В.Г. Хотин, И.И. Томашевич, М.Т. Нгунен и др. М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2007. 87 с.
3. Федоров С.В., Ладов С.В., Никольская Я.М. Сравнительный анализ формирования кумулятивных струй из конических и полусферических облицовок // Инженерный журнал: наука и инновации : электрон. науч.-техн. изд. 2018. № 1. URL : <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1720.html> (Дата обращения: 01.02.2023).
4. Физика взрыва (в 2 т). Т. 2. / Л.П. Орленко, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. М. : Физматлит, 2004. 656 с.
5. Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств // Наука и образование : электрон. науч. изд. 2012. № 2. URL : <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (Дата обращения: 01.02.2023).
6. Компьютерное моделирование процесса вскрытия пласта с использованием кумулятивных зарядов / Б.П. Рыбакин, Н.Н. Смирнов, В.Д. Горячев и др. // Вестник кибернетики. 2018. № 3 (31). С. 9–18.
7. Воеводка А., Витковский Т. Моделирование формирования струи в линейных кумулятивных зарядах // Физика горения и взрыва. 2014. Т. 50. № 3. С. 130–136.
8. Моделирование образования кумулятивной струи модельного заряда // Моделирование и цифровые двойники : сайт. URL : <https://www.cadferm-cis.ru/list/webinars/modelirovanie-obrazovaniya-kumuljativnoj-strui-modelnogo-zarjada/?ysclid=lmzadvsl0z163580729> (Дата обращения: 31.01.2023).
9. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г. Основы применения ANSYS AUTODYN для решения задач моделирования быстропотекающих процессов. Казань : КГТУ, 2016. 280 с.
10. Гапоненко Ю.А. Численное моделирование газовой кумуляции продуктов взрыва при детонации плоских параллельных зарядов // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5. № 4. С. 31–39.
11. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Численное моделирование процесса кумуляции зарядов с сегментными облицовками с применением пакета ANSYS AUTODYN // Нелинейный мир. 2020. Т. 18. № 4. С. 34–40.
12. Митков В.Е., Белин В.А., Шишков П.К. Разработка малочувствительного энергетического взрывчатого материала и создание из него режущих кумулятивных зарядов // Горн. информ.-аналит. бюл. 2022. № 5. С. 108–120.
13. Шилин П.Д. Моделирование кумулятивного эффекта в среде Ansys // Научный форум: Технические и физико-математические науки: сб. ст. по материалам XIII междунар. науч.-практ. конф. Москва, 2018. № 3 (13). С. 5–10.
14. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Моделирование процесса кумуляции зарядов перфораторов при прострелочно-взрывных работах в скважинах // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 4 (585). С. 20–24.
15. Исследования и математическое моделирование явлений, связанных с развитием и воздействием взрывов / В.А. Андрущенко, Е.Л. Ступицкий, Д.С. Моисеева и др. М. : РАН, 2020. 192 с.
16. Балаганский И.А., Мерзиевский Л.А. Взрывные системы с инертными высокомодульными элементами. Новосибирск : НГТУ, 2016. 170 с.
17. Тарасов В.И., Янилкин Ю.В., Ведерников Ю.А. Трехмерное численное моделирование кумулятивных зарядов со звездчатой формой облицовки // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 6. С. 180–185.
18. Мухутдинов А.Р., Ефимов М.Г., Вахидова З.Р. Определение прогиба сегментной облицовки заряда перфоратора при прострелочно-взрывных работах в нефтяных скважинах для обеспечения максимальной глубины пробития моделированием процесса кумуляции // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2023. № 4 (597). С. 27–33.

19. ГОСТ 32162-2013. Вещества взрывчатые промышленные. Классификация. Введ. 2014–01–01. М. : Стандартинформ, 2014. 7 с.
20. ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. Введ. 2008–07–01. М. : Стандартинформ, 2009. 11 с.

References

1. Popov V.V. Prostrelochno-vzryvnye raboty v skvazhinakh [Drilling and blasting in wells]. Novocheboksarsk : YuRGU Publ., 2007. 213 p.
2. Khotin V.G., Tomashevich I.I., Ngunen M.T., Ustimenko V.A. Kumulyatsiya i ee ispol'zovanie vo vzryvnoi tekhnike [Cumulation and its use in explosive technology]. Moscow: RKhTU im. D. I. Mendeleeva Publ., 2007. 87 p.
3. Fedorov S.V., Ladov S.V., Nikol'skaya Ya.M. Sravnitel'nyi analiz formirovaniya kumulyativnykh strui iz konicheskikh i polusfericheskikh oblitsovok [Comparative analysis of the formation of cumulative jets from conical and semi-spherical facings]. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2018, no. 1. Available at: <http://engjournal.ru/catalog/mech/mdsb/1720.html> (Accessed February 1, 2023).
4. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Solov'ev V.S., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Fizika vzryva (v 2 t). T. 2 [Physics of explosion (in 2 vol.). Vol. 2]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2004. 656 p.
5. Kolpakov V.I. Matematicheskoe modelirovanie funktsionirovaniya vzryvnykh ustroystv [Mathematical modeling of the functioning of explosive devices]. *Nauka i obrazovanie* [Science and education], 2012, no. 2. Available at : <http://technomag.edu.ru/doc/334177.html> (Accessed February 1, 2023).
6. Rybakov B.P., Smirnov N.N., Goryachev V.D., Kravchenko M.N., Stomov L.I. Komp'yuternoe modelirovanie protsessa vskrytiya plasta s ispol'zovaniem kumulyativnykh zaryadov [Computer simulation of the formation opening process using shaped charges]. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics], 2018, no. 3 (31), pp. 9–18.
7. Voevodka A., Vitkovski T. Voevodka A., Vitkovski T. Modelirovanie formirovaniya strui v lineinykh kumulyativnykh zaryadakh [Modeling of jet formation in linear shaped charges]. *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of burning and explosion], 2014, vol. 50, no. 3, pp. 130–136.
8. Modelirovanie obrazovaniya kumulyativnoi strui model'nogo zaryada (Elektronnyi resurs) [Simulation of the formation of a cumulative jet of a model charge]. Available at: <https://www.cadfm-cis.ru/list/webinars/modelirovanie-obrazovaniya-kumulyativnoy-strui-modelnogo-zaryada/?ysclid=lmzadvsloz163580729> (Accessed January 31, 2023).
9. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G. Osnovy primeneniya ANSYS AUTODYN dlya resheniya zadach modelirovaniya bystroprotekayushchikh protsessov [Fundamentals of using ANSYS AUTODYN to solve problems of modeling fast-flowing processes]. Kazan': KGTU Publ., 2016. 280 p.
10. Gaponenko Yu.A. Chislennoe modelirovanie gazovoi kumulyatsii produktov vzryva pri detonatsii ploskikh paralel'nykh zaryadov [Numerical simulation of gas accumulation of explosion products during detonation of plane parallel charges]. *Vychislitel'nye tekhnologii* [Computational Technologies], 2000, vol. 5, no. 4, pp. 31–39.
11. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Chislennoe modelirovanie protsessa kumulyatsii zaryadov s segmentnymi oblitsovkami s primeneniem paketa ANSYS AUTODYN [Numerical simulation of the charge accumulation process with segment facings using the ANSYS AUTODYN package]. *Nelineinyy mir* [Nonlinear World], 2020, vol. 18, no. 4, pp. 34–40.
12. Mitkov V.E., Belin V.A., Shishkov P.K. Razrabotka malochuvstvitel'nogo energeticheskogo vzryvchatogo materiala i sozdanie iz nego rezhushchikh kumulyativnykh zaryadov [Development of low-sensitivity energy explosive material and creation of cutting shaped charges from it]. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining information and analytical bulletin], 2022, no. 5, pp. 108–120.
13. Shilin P.D. Modelirovanie kumulyativnogo effekta v srede Ansys [Modeling of the cumulative effect in the Ansys environment]. *Sbornik statei po materialam XIII mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Nauchnyi forum: tekhnicheskoe i fizikomatematicheskie nauki»* [Proceedings based on the materials of the XIII International Scientific and Practical Conference «Scientific forum: technical and physics and mathematical sciences»]. Moscow, 2018, no. 3 (13), pp. 5–10.
14. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Modelirovanie protsessa kumulyatsii zaryadov perforatorov pri prostrelochno-vzryvnykh rabotakh v skvazhinakh [Modeling of the process of accumulating charges of perforators during drilling and blasting operations in wells]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the fuel and energy complex], 2022, no. 4 (585), pp. 20–24.
15. Andrushchenko V.A., Stupitskii E.L., Moiseeva D.S., Motorin A.A., Murashkin I.V. Issledovaniya i matematicheskoe modelirovanie yavlenii, svyazannykh s razvitiem i vozdeistviem vzryvov [Research and mathematical modeling of phenomena related to the development and impact of explosions]. Moscow: RAN Publ., 2020. 192 p.
16. Balaganskii I.A., Merzhievskii L.A. Vzryvnye sistemy s inertnymi vysokomodul'nymi elementami [Explosive systems with inert high-modulus elements]. Novosibirsk: NGTU Publ., 2016. 170 p.
17. Tarasov V.I., Yanilkin Yu.V., Vedernikov Yu.A. Trekhmernoe chislennoe modelirovanie kumulyativnykh zaryadov so zvezdoobraznoi formoi oblitsovki [Three-dimensional numerical simulation of shaped charges with a star-shaped lining]. *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of burning and explosion], 2000, vol. 36, no. 6, pp. 180–185.
18. Mukhutdinov A.R., Efimov M.G., Vakhidova Z.R. Opredelenie progiba segmentnoi oblitsovki zaryada perforatora pri prostrelochno-vzryvnykh rabotakh v neftyanykh skvazhinakh dlya obespecheniya maksimal'noi glubiny probitiya modelirovaniem protsessa kumulyatsii [Determination of the deflection of the segmental lining of the perforator charge during drilling and blasting operations in oil wells to ensure the maximum penetration depth by modeling the cumulating process]. *Avtomatizatsiya i informatizatsiya TEK* [Automation and informatization of the Fuel and energy Complex], 2023, no. 4 (597), pp. 27–33.

19. GOST 32162-2013. Veshchestva vzryvchatye promyshlennye. Klassifikatsiya [State Standard 32162-2013. Commercial explosives. Classification]. Moscow: Standartinform Publ., 2014. 7 p.

20. GOST 380-2005. Stal' uglerodistaya obyknovennogo kachestva. Marki [State Standard 380-2005. Common quality carbon steel. Grades]. Moscow: Standartinform Publ., 2009. 11 p.

Информация об авторах

Мухутдинов Аглям Рашидович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: muhutdi-nov@rambler.ru.

Вахидова Зульфия Рашидовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики, Университет управления «ТИСБИ», г. Казань; e-mail: MRZulphiya@rambler.ru.

Ефимов Максим Геннадьевич, ассистент кафедры технологии твердых химических веществ, Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань; e-mail: jero07@bk.ru.

Information about the authors

Aglyam R. Mukhutdinov, Doctor of Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: muhutdinov@rambler.ru.

Zul'phiya R. Vakhidova, Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics, University of Management «TISBI», Kazan'; e-mail: MRZulphiya@rambler.ru.

Maksim G. Efimov, Assistant of the Department of Technology of Solid Chemicals, Kazan National Research Technological University, Kazan'; e-mail: jero07@bk.ru.