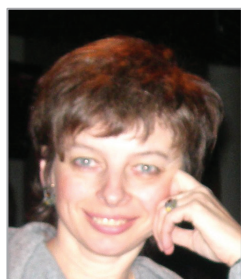


ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ВНУТРИ ОБОЛОЧНОГО УСТРОЙСТВА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ



Рыбакин Борис Петрович

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры газовой и волновой динамики МГУ имени И.М. Ломоносова



Кравченко Марина Николаевна

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нефтегазовой и подземной гидромеханики РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина



Садринов Дмитрий Рафаэльевич

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

Аннотация. В данной работе представлены результаты численного моделирования процесса образования кумулятивной струи при инициировании заряда твердого ВВ внутри оболочечного устройства сложной формы, отвечающей параметрам реального пиропатрона, используемого в нефтегазовой отрасли. Математическая модель описывает развитие детонационного процесса при разложении твердого ВВ, деформирование оболочки пиропатрона и лайнера, и образования канала в комплексной преграде. Расчеты проводятся на основе оригинального численного кода.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского Фонда Фундаментальных Исследований №18-07-01303А.

Ключевые слова: численное моделирование, детонация, пиропатрон, кумулятивная струя, лайнер.

Annotation. In his paper the authors present the results of a numerical simulation of the formation of a cumulative jet during the initiation of a solid explosive charge inside a complex shell device that meets the parameters of a real pyro cartridge used in the oil and gas industry. The mathematical model describes the development of the detonation process during the decomposition of a solid explosive, the deformation of the shell of the squib and liner, and the formation of a channel in a complex barrier. Calculations are based on the original numerical code.

This work was supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research No. 18-07-01303A.

Key words: numerical simulation, detonation, squib, cumulative jet, liner.

Введение

Работа является продолжением исследований авторов в области изучения особенностей развития процесса детонации внутри пиропатронов, исполь-

зуемых в промышленных перфораторах, которые применяются в нефтегазовом деле (для вторичного вскрытия пластов при закачивании скважин на газовых и нефтяных месторождениях, при капитальном

ремонта скважин), в геологических исследованиях (проведении геофизических исследований, создания генераторов для отбора грунта) и космической отрасли (для открытия топливных магистралей, всевозможных запорных устройств, разделения ступеней ракет и т.д.) [1, 2, 3].

Оптимизация формы пиропатрона является чрезвычайно актуальной инженерной задачей. Пиропатрон представляет собой металлический корпус, как правило стальной, закрытый с обратной стороны металлическим вкладышем (стальным или из цветного металла). Размер и форма оболочки, масса заряда и тип ВВ определяются требованиями конкретной отраслевой или инженерной задачи. В нефтегазовом деле выбор инструмента для вскрытия пласта (перфорирования) во многом зависит от особенности проводки скважины (инклинометрии), глубины залегания вскрываемого пропластка, свойств насыщенного коллектора (пластовых давления и температуры, пористости и проницаемости, упругих и прочностных свойств минеральной матрицы), степени закольматированности прискваженной области (при бурении и строительстве скважины). При вскрытии пластов могут применяться различные способы вскрытия пласта с использованием специального оборудования: гидродеспектрального инструмента, сверлильного, стреляющих и кумулятивных перфораторов. Преимущество именно кумулятивных перфораторов над другими устройствами заключается в возможности их использования в скважинах со сложной инклинометрией, создания протяженных каналов в заданном интервале продуктивного пропластка и достижении высокой степени связи пласта и скважины, от которых существенно зависят показатели разработки месторождений. Основной принцип действия кумулятивных перфорационных систем (корпусных и бескорпусных) основан на создании высокоэнергетической кумулятивной струи, возникающей при выделении газов при детонационном процессе разложении взрывчатого вещества (ВВ), заключенного внутри металлической оболочки сложной формы. За счет специальной формы основной толстостенной оболочки (Рис.1) в процессе отражения детонационной волны от стенок оболочки возникает иглообразная высокотемпературная струя, состоящая из газа высокого сжатия и расплавленного металла вкладыша лайнера. Струя имеет высокую пробивную способность, за счет чего осуществляется перфорирование обсадной колонны скважины, цементного кольца и создаются протяженные каналы в минеральном каркасе (скелете) насыщенного коллектора. При проведении перфорационных работ очень важной задачей помимо создания одиночных каналов является разрушение корки спекания вокруг канала в пористом минеральном скелете за счет образования сетки мелких трещин. Этого эффекта можно добиться за счет изменения формы пиропатрона (внешней оболочки и лайнера), кратности (неодиночности) пиропатронов и их взаимного рас-

положения (под различными углами относительно друг друга) [4].

Описание устройства

Во всех случаях (для нефтегазовой и для космической отраслей) требованием к пиропатрону является достижение заданных характеристик таких как: небольшие размеры, короткое время срабатывания (доли секунды), высокая скорость струи, стойкость к внешним условиям (давлению и температуре), надежность устройства.

Для перфораторов, используемых в нефтяной промышленности, применяют пиропатроны с конической или скругленной формой лайнера [5, 6, 7], в космической отрасли используется в основном плоская пластина [3]. При этом при объемах ВВ до 30 см³ развиваемые давления достигают уровней около 250 Мпа при обратной зависимости от объема (при сжатии).



Рис. 1. Облицовки различных типов пиропатронов

На рис. 1 показаны оболочки промышленно используемых пиропатронов, где видим, что внешняя корпусная оболочка имеет коническую или коническо-цилиндрическую форму. Тип пиропатрона определяется внешним диаметром, толщиной оболочки, массой и типом ВВ. Вкладыш, называемый лайнером, (колпачок, закрывающий ВВ от внешней среды), как правило, изготавливается из цветных металлов (меди или алюминия, хотя для различных нужд используют и другие металлы и даже слоистые лайнеры [8]) и при развитии детонации в расплавленном виде является компонентом газожидкостной струи. При этом иницирование взрыва ВВ в разных технологических схемах может существенно различаться.

В нефтяной промышленности используют корпусные и бескорпусные кумулятивные перфораторы. Вторые предпочтительны, когда скважина имеет сложную инклинометрию и доставка пиропатронов на нужный горизонт в жестком корпусе невозможна (пиропатроны закрепляются герметично на каркасных единицах, соединенных между собой в виде пазла [9]). При этом необходимо, чтобы ВВ начинки пирозаряда было герметично изолировано от внутрискважинной жидкости, что является обязательным требованием во избежание возникновения фугасного действия. Именно поэтому для бескорпусных перфораторов ставится жесткое условие на герметичность всех индивидуальных зарядов, в то время как для корпусных необходимо достигать герметичности корпуса перфоратора. Для корпусных перфораторов многозарядного действия (ПК, ПКДУ, ПKN различных серий [10] производитель постулирует достижение давлений 80–120 Мпа, температур до 180–200оС, и скорости струи около 6–8 км/с (табл. 1).

Таблица 1

	Максимально развиваемые давления, Мпа	Температура, °С	Скорость струи, км/с	Плотность перфорации на 1 метр	Число зарядов за спуск
Корпусные перфораторы	80–120	180–200	6–8	12	20–30
Бескорпусные перфораторы	50–80	100–150	Нет точных данных	6–11	300

Для одноразовых корпусных перфораторов (ПКО, ПКОТ, ПНКТ, ЗПК разных серий) развиваемое давление и температура имеют примерно те же уровни, что и для многоразовых, в то время как число зарядов в действии за один спуск может достигать 60 (при фактически той же плотности перфорации на 1 м), что дает возможность провести перфорирование большего интервала. Для бескорпусных перфораторов (ПКС, ПКРУ, ПР) давления и температуры несколько ниже, чем для корпусных, но при этом за один спуск можно использовать на порядок большее число зарядов для вскрытия большего интервала с плотностью перфорации 6–11 на 1 м.

Другой характеристикой зарядов является их пробивная способность. Как правило в документации речь идет о пробивании комплексной преграды. Под комбинированной преградой обычно понимают мишень из стальной пластины толщиной около 10 мм, цементного камня 20 мм, иногда добавляют в мишень слой искусственного песчаника высокой плотности [5, 7, 10]. Промышленные корпусные перфораторы многоразового действия дают длину канала 95–255 мм при диаметре от 3 до 12 мм, одноразовые корпусные позволяют получить отверстия примерно того же размера. Для бескорпусных перфораторов постулируются длина канала до 275 мм при диаметре 8–12 мм.

Заряды для различных корпусных перфораторов (ПК, ПКТ и др.) различных производителей (Завода им. Я.М. Свердлова [6], Чапаевского механического завода [7]) имеют еще более высокие характеристики по пробиванию комплексных преград. В качестве начинки зарядов используются бризантные твердые ВВ. При этом лайнер для пиропатронов указанных производителей имеет не коническую, а закругленную к центру форму. Заряды имеют массу ВВ около 19–23 г при этом диаметр канала пробития 9–13 мм, а длина канала в комплексной преграде до 786 мм. Организация ВНИПИВзрыв геофизика предлагает заряды примерно той же мощности и характеристик. АО БашВзрывТехнологии постулируют пробивную способность их устройств до 1 м и диаметре отверстия 22 мм при массе заряда до 36 грамм [11]. Компания ООО «Промперфоратор» специализируется на изготовлении самих промышленных перфорационных систем однократного и многократного применения с пробивной способностью до 750 мм для комплексной преграды [12].

Численное моделирование

Так как на практике в лабораторных условиях одновременно при создании и испытании нового изделия удовлетворить всем условиям достаточно сложно, необходимо проведение многочисленных испытаний на лабораторных стендах с выявлением конструктивных особенностей, материалов оболочки, типа ВВ. Кроме того возможности в регистрации параметров процесса весьма ограничены. Как правило фиксируется время, скорость и конечные разрушения. Преимуществом численного имитационного моделирования является возможность получить всеобъемлющую информацию о процессе путем контроля за изменением скорости, плотности, напряжения в любых областях и точках, где мы хотим разместить контрольные метки. Мы можем получать информацию в режиме реального времени с записью всех временных характеристик гидродинамических параметров. На основании анализа этих данных можно выявить время и скорость развития детонации при различных типах ВВ и методах иницирования, наблюдать как деформируются оболочки зарядов, отслеживать момент перехода течения в металлах из упругого в пластический режим, устанавливать момент отрыва лайнера от внешнего корпуса. Путем анализа всех этих характеристик можно определить влияние геометрических форм, провести численные «эксперименты» с оболочками разной толщины из различных материалов, оценить влияние типа ВВ и массы заряда, то есть оптимизировать форму устройства, выявляя наиболее устойчивый режим с образованием кумулятивной струи максимальной мощности. Кроме того, с помощью численных экспериментов можно промоделировать последующее развитие процесса в условиях конкретной инженерной задачи, то есть наглядно видеть последовательные этапы деформирования оболочки, взаимодействие струи с преградой, образование отверстий, каналов и т.д.

В предыдущих работах авторов подробно описана математическая модель, которая позволяет на основе собственного численного кода рассчитать детонационный процесс внутри оболочки кумулятивного заряда с последующей деформацией и разрушением корпуса заряда [8, 13]. Было установлено, что для конического стального лайнера скорость струи существенно зависит от угла и имеет максимальное значение 4785 м/с при угле раскрытия конического лайнера в 38°, что качественно согла-

суется с лабораторными и теоретическими (численными) экспериментами других авторов.

Для сопоставления с результатами натурных испытаний авторами был проведен расчет работы кумулятивных зарядов, отвечающих промышленным разработкам [7]. На рис. 2. Приведена расчетная сетка пиропатрона (синим) и положение детонационной волны, распространяющейся от точки инициализации ВВ. Цифрами показаны места расположения «датчиков» (сенсоров), в которых производится запись всех характеристик течения.

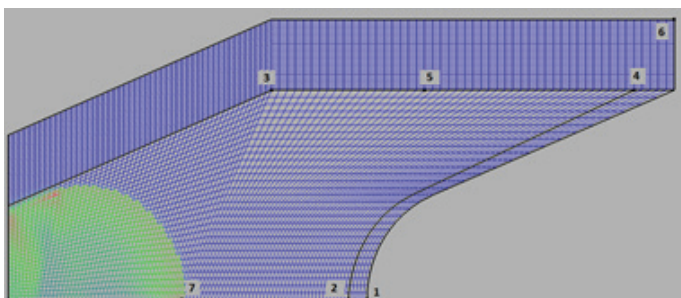


Рис. 2. Начальный момент распространения детонационной волны. Цифрами показаны номера «сенсоров», в которых происходит запись данных

Результаты численного моделирования приведены на рис. 3–4. На рис. 3 показаны графики изменения напряжений в семи контрольных точках, указанных на рис. 2, которые позволяют контролировать изменение типа течения от упруго к пластического, возникновение разрывов сплошности («отколов») при растягивающих напряжениях. «Сенсоры» 2 и 4 (оранжевая и желтая линии) фиксируют изменения в состоянии лайнера при воздействии детонационной волны.

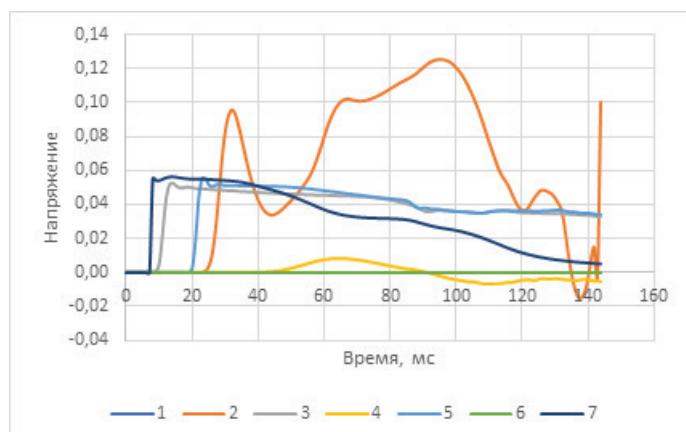


Рис. 3. График зависимости напряжения от времени для указанных сенсоров

На рис. 4 приведены временные эпюры, показывающие зависимость скорости носика кумулятивной струи для лайнеров, «выполненных» из разных материалов. Как видим при использовании алюминиевого лайнера максимально достигаемая скорость струи выше на 40%, чем для медного лайнера при одинаковых прочих условиях.

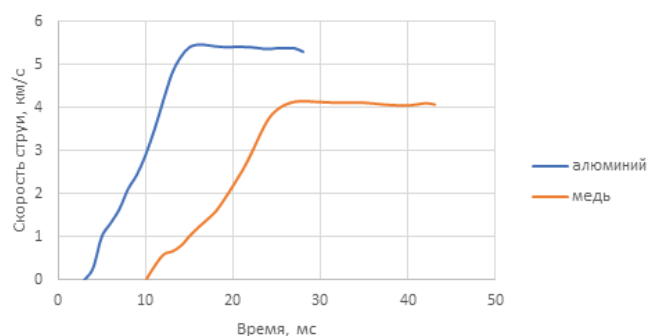


Рис. 4. Скорость кумулятивной струи от времени для различных материалов лайнера

Благодарности

Авторы благодарят за поддержку грант РФФИ 18-07-01303

Список литературы

1. **Янтурин А.Ш.** О выборе типа перфоратора для обеспечения экологически целесообразного качества вторичного вскрытия продуктивных пластов / А.Ш. Янтурин, А.Х. Габзалилова, З.А. Гарифуллина [и др.] // Современные технологии в нефтегазовом деле: сб. тр. Междунар. науч.-технич. конф. – В 2-х т. – 2018. – С. 256–259.
2. **Лотарев В.А.** Информативность комплекса геофизических методов и характеристика процессов, происходящих при вскрытии пластовых систем кумулятивной перфорацией / В.А. Лотарев, И.М. Згоба, А.Ю. Каменский // НТВ «Каротажник». – 2007. – Вып. 155. – С. 124–135
3. **Буянова Л.В.** Методика проектирования пиротехнических устройств систем отделения / Л.В. Буянова, Е.И. Журавлёв // Инженерный вестник. – №7. – 2015. – С. 3.
4. **Исаев В.И.** Условия возникновения трещин между перфорационными каналами, влияющими на увеличение пористости горной породы / В.И. Исаев, А.Ю. Владимиров, К.Ю. Шепель // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. – 2016. – № 3. – С. 47–52.
5. Сайт АО «БВТ» производителя кумулятивных зарядов для вскрытия продуктивных пластов в нефтяных и газовых скважинах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bvt-s.ru/news/90/>.
6. ФГУП «Завод им. Я.М. Свердлова» Кумулятивный заряд. Патент RU 17943 U1. Заявка: 2000129073/20, 2000.11.21.
7. Сайт Чапаевского механического завода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mehzavod.su>.
8. **Рыбакин Б.П.** Оптимизация процесса вторичного вскрытия пласта кумуляционным методом / Б.П. Рыбакин, М.Н. Кравченко, В.Д. Горячев // Углеводородный и минерально-сырьевой потенциал кристаллического фундамента: Материалы док. Междунар. науч.-практ. конф. (2–3 сентября 2019). – Казань: Ихлас, 2019. – С. 263–266.

9. **Шипиловских Н.В., Шакиров Р.А.** Бескорпусный скважинный кумулятивный перфоратор. Патент RU 179964 U1. Заявка: 2017132125, 2017.09.13.
10. **Булатов А.И.** Техника и технология бурения нефтяных и газовых скважин [Электронный ресурс] / А.И. Булатов, Ю.М. Проселков, С.А. Шаманов. – Режим доступа: <http://proofoil.ru/Oilproduction/Borewell9.html>.
11. Сайт АО БашВзрывТехнологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tek-all.ru>.
12. Сайт ООО «Промперфоратор» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.promperforator.ru>.
13. **Рыбакин Б.П.** Компьютерное моделирование процесса вскрытия пласта с использованием кумулятивных зарядов / Б.П. Рыбакин, Н.Н. Смирнов, В.Д. Горячев [и др.] // Вестник Кибернетики. № 3 (31) 2018 С. 1–10.

РАЗДЕЛ IV. ПРОЕКТНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В ОБЛАСТИ КУЛЬТУРЫ, СПОРТА И ТУРИЗМА

КОМПЕТЕНЦИИ БУДУЩЕГО ДЛЯ СПЕЦИАЛИСТОВ СФЕРЫ ТУРИЗМА И ГОСТЕПРИИМСТВА



Беломестнова Маргарита Евгеньевна

Кандидат педагогических наук, доцент кафедры туризма и гостиничного дела РГУФКСМиТ

Аннотация. С учетом факторов, обусловленных трансформацией общества и развитием цифровых технологий, в статье рассматриваются ключевые навыки, необходимые специалистам сферы туризма и гостеприимства XXI века.

Ключевые слова: компетенция, компетентность, специалист сферы туризма и гостеприимства, профессиональные навыки будущего, компетенции будущего.

Annotation. Taking into account the factors caused by the transformation of society and the development of digital technologies, the article examines the key skills required for specialists in the field of tourism and hospitality of the 21st century.

Key words: competence, competence, specialist in the field of tourism and hospitality, professional skills of the future, competence of the future.

В настоящее время повсеместно ведутся дискуссии о ключевых навыках, необходимых специалистам в XXI веке, о моделях «компетенций будущего».

Институтом будущего (The Institute for the Future, Palo Alto, USA) сформулированы главные факторы, которые изменят перспективы получения работы, в т.ч. в сфере туризма и гостеприимства, в течение следующих десяти лет. В их число входят чрезвычайное долголетие, улучшение интеллектуальных машин и систем, «умные» сети, новые СМИ, суперструктурированные организации, глобальный связанный мир [5].

В последние годы практика туристской и гостиничной индустрии как в нашей стране, так и за рубежом формируется под влиянием факторов, которые обусловлены трансформацией общества и развитием цифровых технологий.

В Атласе новых профессий (составлен по результатам исследования «Форсайт Компетенций

2030» Московской школы управления «Сколково» и Агентства стратегических инициатив) обозначены такие профессии в сфере туризма и гостеприимства как архитектор территорий, дизайнер дополненной реальности территорий, разработчик тур-навигаторов, разработчик интеллектуальных туристских систем, режиссер индивидуальных туров и др.

Понятие компетенции сформулировал и изначально начал употреблять применительно к теории языка американский лингвист Н. Хомский, отмечавший, что «...мы проводим фундаментальное различие между компетенцией (знанием своего языка говорящим – слушающим) и употреблением (реальным использованием языка в конкретных ситуациях) [2].

В широкое обращение термин «компетенция» вводит в 1959 г. Р. Уайт («Motivation reconsidered: the concept of competence», 1959), описывая те способности личности выпускника учебного заведения, ко-