

А. А. Мокеев, А. С. Сальников, Л. Х. Бадретдинова,  
А. П. Евдокимов

## ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ЗАРЯДОВ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Ключевые слова:* лабораторный стенд, комбинированный заряд, энергонасыщенный материал.

*Разработан лабораторный стенд для изучения характеристик горения комбинированных зарядов энергонасыщенных материалов. Были проведены эксперименты по регистрации профиля давления в процессе горения комбинированных зарядов. Получены результаты исследований свидетельствующие о возможности регистрации профилей давления в лабораторном стенде при горении комбинированных зарядов с сочетанием медленногорящих и быстрогорящих энергонасыщенных материалов.*

*Keywords:* laboratory bench, combined charge, energy-materials.

*Laboratory bench to study the combustion characteristics of the combined charge of energy-materials was developed. Experiments were performed on the registration of the pressure profile in the combustion process combined charges. The results of studies indicating the possibility of registering pressure profiles in a laboratory bench during combustion combined with a combination of slow-burning charges rapidly burning energy-materials.*

### Введение

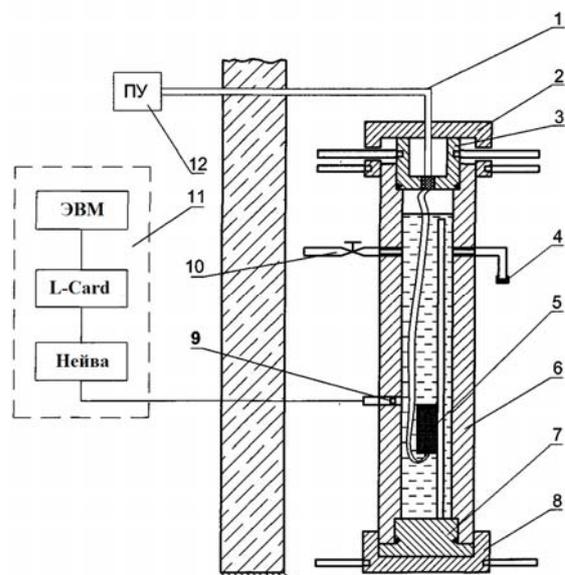
При исследовании характеристик горения энергонасыщенных материалов используются стенды, представляющие собой манометрические сосуды с системами регистрации давления. Суть исследований заключается в определении зависимости давления в сосуде стенда от времени горения образца. В Казанском национальном исследовательском технологическом университете подобные стенды используются при разработке и исследовании устройств и составов на основе энергонасыщенных материалов, применяемых для обработки нефтяных скважин [1,2,3,4]. Эти устройства обладают низкой скоростью горения и удельного газообразования, что в условиях испытательного стенда способствует медленному повышению давления. Длительность процесса повышения давления до максимального значения составляет от нескольких секунд до нескольких минут. При этом используется регистрирующая аппаратура с низкими частотными характеристиками. При исследовании составов с высокой скоростью горения удельного газообразования используется аппаратура с высокой частотой регистрации данных, а длительность процесса составляет доли секунды.

В последние годы все большее распространение получают комплексные методы воздействия, сочетающие различные виды воздействия в одной скважинной операции, например комплексное устройство, описанное в работе, позволяющее одновременно производить перфорацию и кислотную обработку призабойной зоны [5]. Дальнейшее совершенствование данного устройства включает разработку комбинированных зарядов, сочетающих медленногорящие и быстрогорящие энергонасыщенные материалы, с передачей горения от медленногорящего к быстрогорящему. Регистрация давления во времени комбинированных зарядов затруднена, поскольку применение низкочастотной аппаратуры не

позволяет осуществить регистрацию скачка давления от быстрогорящего заряда. При использовании высокочастотной аппаратуры для протекания медленно протекающих процессов необходимы вычислительные системы с огромными объемами оперативной памяти.

### Экспериментальная часть

С целью полноценной регистрации профилей давления комбинированных зарядов сотрудниками кафедры ТТХВ применена станция регистрации давления Нейва 10000 с пьезоэлектрическими датчиками типа РСВ, имеющими встроенный усилитель сигнала и регулируемую частоту обработки сигнала. Схема лабораторного стенда представлена на рис. 1.



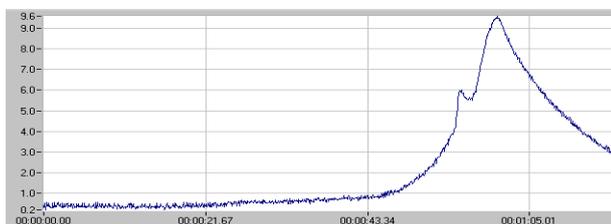
1 – электрическая линия; 2, 8 – крышка; 3, 7 – пробка;  
4 – предохранительный клапан; 5 – образец; 6 – корпус установки;  
9 – пьезоэлектрический датчик; 10 – линия сброса давления;  
11 – регистрирующая аппаратура; 12 – пусковое устройство

Рис. 1 – Схема лабораторного стенда

Были проведены эксперименты по регистрации профиля давления в процессе горения комбинированных зарядов при частотах регистрации сигналов 50, 100 и 150 кГц. Установлено, что при частотах 100 и 50 кГц файлы с результатами имеют невысокую емкость, что позволяет выполнять их оперативную обработку. Однако при 50 кГц профиль давления быстрогорящего заряда имеет значительное расхождение в максимальных значениях в выборки из десяти экспериментов. При 150 кГц файлы имеют значительный объем, что затрудняет обработку результатов, поэтому для выполнения тестовых испытаний лабораторного стенда было решено выбрать рабочую частоту 100 кГц.

На начальном этапе тестовых испытаний выполнено исследование двухслойных комбинированных зарядов, состоящих из медленногорящего состава и быстрогорящего состава с различными характеристиками горения. В качестве медленногорящего был использован энергонасыщенный материал термоисточника, состоящий из 72% нитрата аммония, 25% эпоксидного компаунда и 3% бихромата калия. Быстрогорящий энергонасыщенный материал состоял из окислителя и горючего в соотношениях 50/50 и 75/25.

На рис. 2 представлены результаты регистрации профиля давления при сгорании комбинированного заряда из медленногорящего энергонасыщенного материала и быстрогорящего с соотношением окислителя и горючего 50/50. Быстрогорящий заряд был сформирован двумя шашками высотой 18 мм каждая и диаметром 54 мм. При сгорании медленногорящий состав в течении 44 с создал предварительное давление в стенде 1 МПа. Далее горение передалось на быстрогорящий заряд, который сгорел в течении 14,6 с. Зарегистрирован момент перехода процесса горения от одной шашки к другой примерно в области 60 МПа. Вероятно, при изготовлении опытных образцов образовался воздушный зазор между шашками, что и привело к задержке передачи горения от одной шашки к другой.



Сочетание энергонасыщенного материала: медленногорящий / быстрогорящий с соотношением окислителя и горючего 50/50

**Рис. 2 – Профиль давления при сгорании комбинированного заряда**

Обработка результатов эксперимента позволяет определить скорости горения составов в следующих диапазонах давления: медленногорящий состав имеет скорость горения 0,68 мм/с в диапазоне давлений от 0 до 1 МПа, а

быстрогорящий 2,47 мм/с в диапазоне от 1,0 до 9,6 МПа. Эти значения соответствуют значениям полученным ранее при исследовании энергонасыщенных материалов в виде индивидуальных зарядов.

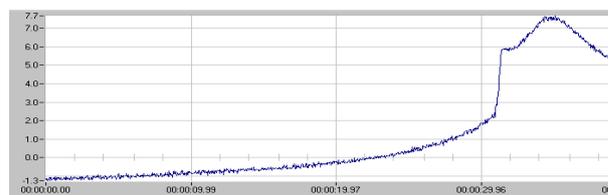
В следующем этапе исследовались комбинированные заряды из медленногорящего энергонасыщенного материала и быстрогорящего с соотношением окислителя и горючего 75/25. Результаты, представленные на рис. 3 показывают, что медленногорящий состав создал предварительное давление 4,2 МПа и сгорел за 14,5 с, что соответствует скорости горения (при высоте заряда 30 мм) 2,07 мм/с. Быстрогорящий состав при высоте 33,85 мм сгорел за 0,5 с в диапазоне давлений от 4,2 до 8,8 МПа, что соответствует скорости горения 67,7 мм/с.



Сочетание энергонасыщенного материала: медленногорящий / быстрогорящий с соотношением окислителя и горючего 75/25

**Рис. 3 – Профиль давления при сгорании комбинированного заряда**

На следующем этапе определяли характеристики горения трехслойных комбинированных зарядов в следующем сочетании энергонасыщенных материалов: медленногорящий / быстрогорящий (75/25) / медленногорящий.



Сочетание энергонасыщенного материала: медленногорящий / быстрогорящий с соотношением окислителя и горючего 75/25 / медленногорящий

**Рис. 4 – Профиль давления при сгорании комбинированного заряда**

Из рис. 4 видно, что первый медленногорящий состав сгорел за 31 с создав давление 2,2 МПа. Таким образом скорость горения в диапазоне давлений от 0 до 2,2 МПа составила 0,97 мм/с. Быстрогорящий состав сгорел за 0,7 с при высоте заряда 36 мм, что соответствует скорости горения 51,4 мм/с. Далее горение передалось на второй медленногорящий заряд, который в интервале давлений от 5,9 до 7,7 МПа за 6 с, что соответствует скорости горения около 5 мм/с. Выполненные расчеты показывают, что при проведении эксперимента можно проследить зависимость скорости горения от диапазонов давления в стенде.

## Заклучение

Полученные результаты исследований свидетельствуют о возможности регистрации профилей давления в лабораторном стенде при горении комбинированных зарядов с сочетанием медленногорящих и быстрогорящих энергонасыщенных материалов. При этом полученные кривые могут быть легко обработаны с целью получения значений скорости горения и ее зависимости от диапазонов давления. Преимуществом стенда является возможность изучения комбинированных зарядов в едином эксперименте с получением информации не только о кинетике горения каждого энергонасыщенного материала, но и о явлении воспламенения и переходе фронта горения между отдельными зарядами.

## Литература

1. Мокеев А.А. Универсальный химический реагент для кислотной обработки призабойной зоны нефтяных пластов из карбонатных и терригенных пород / А.А. Мокеев, И.Ф. Садыков, А.А. Марсов // Вестник

- Казанского технологического университета. – Казань, КНИТУ, 2013, №13, с.190-193.
2. Бадретдинова Л.Х. Исследование зависимости характеристик горения от физической стабильности энергонасыщенного материала термоисточника / Л.Х. Бадретдинова, А.А. Мокеев, А.А. Марсов, И.Ф. Садыков // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, КНИТУ, 2014.- т.17.- №7.- С.120-123.
3. Бадретдинова Л.Х. Создание желатинообразного горюче-окислительного состава для обработки скважин / Л.Х. Бадретдинова, И.Ф. Садыков // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, КНИТУ, 2014.- т.17.- №2. - С.281-284.
4. Бадретдинова Л.Х. Способ обработки призабойной зоны пласта жидким горюче-окислительным составом / Л.Х. Бадретдинова, И.Ф. Садыков // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, КНИТУ, 2014.- т.17.- №4. - С.254-256.
5. Чипига С.В. Устройство для комплексной перфорации и кислотной обработки призабойной зоны скважины / С.В. Чипига, И.Ф. Садыков, А.А. Марсов, А.А. Мокеев // Вестник Казанского технологического университета.- Казань, КНИТУ, 2012.- т.15.- №6.- С.174-177.

© **А. А. Мокеев** – канд. техн. наук, доц. кафедры ТТХВ КНИТУ, alexander\_mokeev@mail.ru; **А. С. Сальников** – асп. той же кафедры, lucifer21@yandex.ru; **Л. Х. Бадретдинова** – канд. техн. наук, асс. той же кафедры, salamandra\_1985@mail.ru; **А. П. Евдокимов** – магистр той же кафедры.

© **A. A. Mokeev** – PhD, Associate Professors of department of Technology of Solid Chemical Substances KNRTU, alexander\_mokeev@mail.ru; **A. S. Salnikov** – Graduate student of the same department, lucifer21@yandex.ru; **L. Kh. Badretdinova** – PhD., Ass. of the same department, salamandra\_1985@mail.ru; **A. P. Evdokimov** – Master Degree of the same department.