DOI: 10.15593/2224-9982/2018.55.04

УДК 536.45: 621.454.3

К.А. Ваганов, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

СОПЛОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЗАРЯДОВ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Обосновывается актуальность создания сопловой установки для проведения огневых стендовых испытаний зарядов твердого топлива, применяемых для нефте- и газодобывающей промышленности. Для разработки такой установки сформулированы цели и задачи, а также решен ряд вопросов, связанных с особенностью организации и моделирования рабочего процесса при испытании. Разработаны принципиальная схема, система измерения и датчики. Приведены массо-габаритные характеристики испытываемых зарядов твердого топлива. Кратко рассмотрен процесс проведения испытаний на установке. Даны результаты испытаний, проведенных в течение двух лет на опытном образце сопловой установки; рассмотрен вариант модернизации установки.

В результате произведенных работ получена уникальная сопловая установка, на которой можно проводить испытания зарядов твердого топлива с максимальными размерами изделий: диаметром до 100 мм, длиной до 2,4 м и массой до 20 кг.

Сопловую установку после модернизации можно применять для проведения приемо-сдаточных испытаний и сертификации газогенераторов, предназначенных для нефтегазовой отрасли, а также при проведении НИОКР по темам горения зарядов твердого топлива под водой.

Ключевые слова: заряд твердого топлива, огневые стендовые испытания, внутрикамерные процессы, сопловая установка высокого давления.

K.A. Vaganov, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HIGH-PRESSURE HEATING UNIT FOR TESTS OF SOLID FUEL CHARGES IN WELLS CONDITIONS JET SETTING FOR TESTING CHARGES OF THE SOLID FUEL AT HIGH PRESSURE

The paper provides a rationale for the relevance of creating a nozzle installation for fire bench tests of solid fuel charges used for the oil and gas industry. To develop such an installation, goals and objectives are formulated, as well as a number of issues related to the peculiarity of the organization and modeling of the workflow during the test. A schematic diagram, measurement system and sensors are developed. The mass-dimensional characteristics of solid fuel charges are given. The process of testing on the installation is briefly considered. The article presents the results of tests carried out for two years on a prototype nozzle installation, considered the option of modernization of the installation. As a result of the work performed, a unique nozzle unit is obtained, on which it is possible to test solid fuel charges with maximum dimensions of products: diameter up to 100 mm, length up to 2.4 m and weight up to 20 kg. Nozzle installation after the upgrade, you can apply for conduct acceptance testing and certification of gasifiers designed for oil and gas industry, as well as conducting R & d on the topics of combustion of charges of solid fuel under water.

Keywords: solid propellant charge, a firing bench tests, the in-cell processes, jet installation of high pressure.

Обоснование актуальности создания сопловой установки для испытания зарядов твердого топлива

В нефтяной и газовой промышленности для увеличения нефтеотдачи применяют различные методы. Одним из перспективных методов воздействия на призабойную зону пласта является использование термогазогенерирующих устройств (газогенераторов и пороховых генераторов давления) [1–9].

С целью производства зарядов для данных устройств применяются смесевые и баллистические топлива. Основная особенность состоит в том, что заряды этих устройств в нефте- и газодобывающей отрасли должны работать при температуре до 100 °С и при давлении от 0,1 до 100 МПа.

Изначально заряды из этих топлив были разработаны и изготовлены для применения при температуре от –50 до 50 °С и давлении от 0,1 до 25 МПа и от 100 до 800 МПа.

Цель данного проекта – разработать сопловую установку, предназначенную для проведения огневых испытаний зарядов из баллистического и смесового топлива в жидкости с целью исследования внутрибаллистических характеристик зарядов при температуре до 100 °С и давлении от 0,1 до 100 МПа.

Ранее было разработано несколько конструкций установок для испытания подобных устройств [10–14]. Основным недостатком таких установок состоит в том, что в них можно испытывать только образцы и модели газогенерирующих устройств.

Таким образом, необходимо создать установку, позволяющую испытывать заряд твердого топлива в натуральную величину, а также его комплектующие непосредственно в скважинных условиях.

По проведенному анализу скважин Приволжского региона (Удмуртия, Пермский край, Татарстан и Башкортостан) был выбран средний диаметр скважины 130 мм, именно такого диаметра и проектируется сопловая установка.

Задачи сопловой установки

Основная цель создания сопловой установки – исследование процессов в камере сгорания при горении зарядов твердого топлива в жидкости при высоких значениях температуры и давления.

Для достижения цели необходимо обеспечить следующее:

- подачу скважинной жидкости в сопловую установку с заданными параметрами;
- стабильное и полное фиксирование измеряемых параметров;
- необходимое начальное давление и температуру в сопловой установке;
- возможность расположения внутри сопловой установки зарядов твердого топлива различной конструкции.

На основе требований к сопловой установке и задач, которые она должна решать, сформулированы требования к элементам и системам сопловой установки и задачи проектирования.

1. Для обеспечения подачи скважинной жидкости необходимо решить следующие задачи:
 - разработать систему нагрева скважинной жидкости до заданной температуры;
 - сконструировать напорные магистрали, трубопроводы, баки и другие элементы системы нагрева и подачи жидкости.
2. Для обеспечения надежной и полной фиксации измеряемых параметров необходимо решить следующие задачи:
 - составить перечень параметров, измеряемых при испытании зарядов;
 - разработать систему измерения, обеспечивающую стабильную фиксацию данных измерения в полном объеме, и определить места установки датчиков;
 - подобрать датчики для измерения давления и температуры.
3. Для обеспечения начального давления в сопловой установке необходимо решить следующие задачи:
 - сконструировать систему подачи сжатого газа в сопловую установку;
 - сконструировать сопло установки, обеспечивающее, во-первых, набор начального давления до 10 МПа, а во-вторых, режим работы газогенерирующего устройства, идентичный режиму горения в скважине.

4. Для обеспечения расположения зарядов различных конструкций необходимо разработать устройство, позволяющее устанавливать в камере сопловой установки газогенерирующие заряды как в корпусах, так и без них.

Устройство испытательной сопловой установки

Сопловая установка высокого давления – это техническое устройство для установки объекта испытания в заданное положение, создания условий, приближенных к реальным, воспламенения заряда и съема информации при испытании. Подобные испытательные установки обычно состоят из двух частей [10]:

- 1) исполнительной, включающей объект испытания и системы, обеспечивающие воздействие различных эксплуатационных факторов;
- 2) командной в виде пульта управления и систем информационного обеспечения.

Сложность испытательных сопловых установок постоянно возрастает. Это объясняется увеличением уровня, длительности приложения и усложнением спектра нагрузок, действующих на заряд при горении, которые необходимо имитировать в процессе испытаний.

Принципиальная схема сопловой установки для испытаний зарядов представлена на рис. 1.

Рис. 1. Схема сопловой установки высокого давления

Система нагрева и подачи скважинной жидкости (СНЖ)

Для имитации скважинных условий предлагается использовать систему подготовки и подачи скважинной жидкости с температурой от 15 до 100 °С, включающей в себя следующие элементы:

- сосуд для жидкости 0,1–0,2 м³;
- электронагреватель 1,5–2,0 кВт;
- насос;
- термостат.

Система измерения и управления (СИиУ)

Целью огневого испытания является получение информации о параметрах среды в камере сгорания установки в различные моменты времени. С учетом этих требований разработана система измерения и управления сопловой установки [15, 16].

Система подачи сжатого газа

Система подачи сжатого газа включает в себя баллоны с нейтральным газом (типа азот), систему трубопроводов высокого давления и электроклапана с игольчатым вентилем. Система обеспечивает начальное давление в камере сгорания в диапазоне от 0,1 до 10 МПа.

Устройство крепления зарядов

Для размещения в камере сгорания сопловой установки зарядов твердого топлива в верхней части камеры предусмотрена металлическая решетка, к которой производится крепление зарядов. Она же защищает от перекрытия критического сечения сопла установки зарядом или его частями при горении.

Исследуемые заряды твердого топлива

В рамках данной работы были проведены испытания пороховых зарядов четырех газогенераторов. Конфигурация исследуемых зарядов показана на рис. 2.

Характеристики зарядов представлены в табл. 1.

Рис. 2. Исследуемые заряды твердого топлива

Таблица 1

Характеристики исследуемых зарядов твердого топлива

№ п/п	Наименование	Длина, м	Диаметр, м	Масса, кг	Диаметр канала, м	Форма канала	Отверстия, кол-во/диаметр
1	ЗГРП	0,7	0,068	3,3	–	Звезда	–
2	ЗГРП-АРМ	0,7	0,068	3,2	–	Звезда	7/0,007
3	ЗПГДА-М.80	0,8	0,08	5,5	0,030	Крест	12/0,02
4	ЗПГДА-М.100	0,8	0,1	8,0	0,024	Круг	4/0,02

Работа сопловой установки

Работа сопловой установки осуществляется следующим образом:

- 1) внутрь сопловой установки устанавливают заряд твердого топлива;
- 2) в установку заливают скважинную жидкость заданной температуры;
- 3) на верхнюю часть установки монтируют крышку с соплом и мембраной;
- 4) провода от воспламенительного устройства подключают к линии воспламенения;
- 5) включают систему регистрации сигналов с первичных преобразователей;

- 6) с пульта управления открывают электропневмоклапан на линии подачи сжатого газа и создают необходимое начальное давление от 1 до 10 МПа;
- 7) подают на линию воспламенения напряжение;
- 8) после окончания горения заряда сливают воду и разбирают установку для осмотра на наличие остатков топлива и продуктов сгорания;
- 9) обрабатывают результаты испытания.

В табл. 2 приведены результаты 11 испытаний зарядов, проведенных в период с 2015 по 2017 г.

Таблица 2

Результаты испытаний зарядов твердого топлива в установке УПО

Заряд	Масса, кг	Бок, м ²	Кан, м ²	Продукты сгорания, л	Время горения, воспл. + горение, с	Секундный газоприход, л/с	Максимальное давление, МПа
ЗГРП	10	0,458	0,483	9000	1,16+0,31	6122	658
ЗГРП	10	0,458	0,483	9000	1,0+0,34	6716	642
ЗГРП	10	0,458	0,483	9000	1,28+0,28	5769	804
ЗГРП-АРМ	11	0,501	0,527	9900	0,94+0,31	7920	816
ЗГРП-АРМ	11	0,501	0,527	9900	0,91+0,28	8319	807
ЗГРП-АРМ	11	0,501	0,527	9900	0,97+0,34	7557	787
ЗПГДА-М.80	15	0,588	0,262	13500	3,6+0,72	3132	519
ЗПГДА-М.80	15	0,588	0,262	13500	3,56+0,81	3089	464
ЗПГДА-М.80	15	0,588	0,262	13500	3,65+0,63	3154	548
ЗПГДА-М.100	17,2	0,330	0,110	15400	3,94+0,68	3333	697
ЗПГДА-М.100	17,2	0,330	0,110	15400	4,03+0,78	3202	784

На рис. 3–6 представлены результаты испытаний четырех различных зарядов в виде кривой «давление во времени».

Рис. 3. Изменение давления в установке УПО при горении заряда ЗГРП (масса 10 кг)

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) первоначально горение заряда происходит по каналу, а затем горит уже по всей поверхности;
- 2) в жидкости заряд твердого топлива в начальный момент времени горит не по всей поверхности канала, а по ее части, которую К.А. Ваганов назвал эффективной поверхностью канала – $S_{кэ}$;

3) эффективная поверхность канала зависит от конфигурации и размера канала заряда твердого топлива и выражается через коэффициент эффективности канала – B_k .

Применение этих двух переменных позволит использовать известные формулы [17, 18] в расчетах по теме горения в жидкости и в методике работы на сопловой установке высокого давления.

Рис. 4. Изменение давления в УПО при горении заряда ЗГРП-АРМ (масса 11 кг)

Рис. 5. Изменение давления в УПО при горении заряда ЗПГДА-М.80 (масса 15 кг)

Рис. 6. Изменение давления в УПО при горении заряда ЗПГДА-М.100 (масса 17 кг)

Заключение

В результате произведенных работ получена уникальная сопловая установка, на которой можно проводить испытания зарядов твердого топлива с максимальными размерами изделий: диаметром до 100 мм, длиной до 2,4 м и массой до 20 кг.

Данную установку можно применять для проведения приемо-сдаточных испытаний и сертификации газогенераторов, предназначенных для нефтегазовой отрасли, а также при проведении НИОКР по темам горения зарядов твердого топлива под водой.

Библиографический список

1. Падерин М.Г., Падерина Н.Г. Заряд для газодинамического разрыва пласта ЗГРП 01-1 с электронным блоком измерения характеристик режима работы заряда // Каротажник. – 2006. – № 6. – С. 69–77.
2. Способ обработки продуктивного пласта и устройство для его осуществления по технологии ПГДА-М: пат. 2592865 Российская Федерация; Е21В43/263 / Ваганов К.А., Семенов С.А., Каляев С.Н. Заявл. 23.01.2015; опубл. 27.07.2016.
3. Гаврилов Д.И. Применение ПГДА-М с целью увеличения нефтеотдачи // Наука, образование, общество: тенденции и перспективы развития: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. – 2018. – С. 50–53.
4. Гайворонский И.Н., Ликутев А.Р., Меркулов А.А. Комплекс оборудования и технологий газодинамического разрыва пласта для повышения эффективности разработки месторождений // Нефтяное хозяйство. – 2012. – № 8. – С. 122–125.
5. Применение пороховых генераторов давления для удаления и добычи метана из угольных пластов / К.А. Ваганов, А.А. Ярешко, В.В. Шитиков, Н.М. Пелых // Газовая промышленность. – М.: Газойл-пресс, 2013. – № 7(693). – С. 56–57.
6. Каляев С.Н., Семенов С.А., Макоев О.П. Пороховые генераторы давления // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2011. – № 4. – С. 9–11.
7. Повышение притока нефти пульсирующими зарядами: состояние и перспективы / К.А. Ваганов, А.А. Ярешко, В.В. Шитиков, Н.М. Пелых // Нефтесервис. – 2014. – № 1(25). – С. 42–44.
8. Пороховые генераторы давления в нефтедобывающей промышленности / А.С. Жарков, В.В. Кодолов, М.Г. Потапов, А.В. Курбатов, А.В. Черкасов // Каротажник. – 2006. – № 5(146). – С. 27–37.
9. Ваганов К.А., Переверзев Д.В. Продукция компании «Уралтехнотранс» – для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин // Бурение и нефть. – 2017. – № 1. – С. 36–37.
10. Волков В.Т., Ягодников Д.А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. – М.: Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 2007. – 296 с.
11. Барсуков В.Д., Минькова Н.П., Миньков С.Л. Экспериментальная установка для стендовой отработки газогенераторов, используемых при разрыве нефтеносных пластов // Известия вузов. Нефть и газ. – 1990. – № 12. – С. 49–53.
12. Руденко В.Л., Замаруев В.М., Фалалеев В.И. Расчет длительности горения пороховых зарядов в сопловых установках высокого давления // Химическая физика и мезоскопия. – 2006. – Т. 8, № 2. – С. 248–256.
13. Устройство для вскрытия и обработки призабойной зоны скважины: пат. 2114984 Российская Федерация; Е21В43/117, Е21В43/25 / Садыков И.Ф., Мухутдинов А.Р., Архипов В.Г. Заявл. 20.02.1996; опубл. 10.07.1998.
14. Гарифов К.М. Теоретические и экспериментальные исследования воздействия на нефтяные пласты пороховыми газами. – Казань, 2001. – 88 с.
15. Устройство для стендовой отработки зарядов твердых топлив: пат. 2566852 Российская Федерация / Ваганов К.А. Заявл. 24.06.2014; опубл. 27.10.2015.
16. Ваганов К.А., Бульбович Р.В. Многоканальная система измерений, обработки параметров и управления испытательным стендом на платформе COMPACTRIO // Датчики и системы. – 2015. – № 3. – С. 41–46.
17. Баллистика ствольных систем / В.В. Бурлов [и др.]; под ред. Л.Н. Лысенко и А.М. Липанова; РАН. – М.: Машиностроение, 2006. – 461 с.
18. Внутренняя баллистика РДТТ / А.В. Алиев [и др.]; под ред. А.М. Липанова и Ю.М. Милехина; РАН. – М.: Машиностроение, 2007. – 504 с.

References

1. Paderin M.G., Paderina N.G. Zaryad dlya gazodinamicheskogo razryva plasta ZGRP 01-1 s elektronym blokom izmereniya kharakteristik rezhima raboty zaryada [The charge for gas-dynamic fracturing SGRP 01-1 electronic unit of measure characteristics of the operation mode of the charge]. *STB Karotazhnik*, 2006, No. 6, pp. 69-77.
2. Vaganov K.A., Semenov S.A., Kalyayev S.N. Sposob obrabotki produktivnogo plasta i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya po tekhnologii PGDA-M [A method of processing a productive formation and a device for its implementation by technology PGD-M]. Patent for the invention № 2592865 of the Russian Federation, publ. 27.07.2016
3. Gavrilov D.I. Primeneniye PGDA-M s tselyu uvelicheniya nefteotdachi [Application of PGD-M to increase oil recovery]. Science, education, society: trends and prospects. Collection of materials of the X International scientific-practical conference: in 2 volumes, 2018, pp. 50-53.
4. Gayvoronskiy I.N., Likutov A.R., Merkulov A.A. Kompleks oborudovaniya i tekhnologiy gazodinamicheskogo razryva plasta dlya povysheniya effektivnom razrabotki mestorozhdeniy [Complex of equipment and technologies of gas-dynamic fracturing to enhance the efficiency of the oil and gas fields development]. *Oil industry*, 2012, No. 8, pp. 122-125.
5. Vaganov K.A., Yaresko A.A., SHitikov V.V., Pelykh N.M. Primeneniye porokhovyykh generatorov davleniya dlya udaleniya i dobychi metana iz ugolnykh plastov [Application of powder pressure generators for removal and extraction of methane from coal seams]. Moscow: publishing house "Gasoleros", natural Gas industry, 2013, No. 7(693), pp. 56-57.
6. Kalyayev S.N., Semenov S.A., Makoveyev O.P. Porokhovyye generatory davleniya [Powder pressure generators]. *Oborudovaniye i tekhnologii dlya neftegazovogo kompleksa*, 2011, no. 4, pp. 9-11.
7. Vaganov K.A., Yaresko A.A., SHitikov V.V., Pelykh N.M. Povysheniye pritoka nefti pul'siruyushchimi zaryadami: sostoyaniye i perspektivy [The increase in oil flow pulsating charges: status and prospects]. *Nefteservis*, 2014, № 1(25), pp. 42-44.
8. Zharkov A.S., Kodolov V.V., Potapov M.G., Kurbatov A.V., Cherkasov A.V. Porokhovyye generatory davleniya v nefte dobyvayushchey promyshlennosti [Pressure generators in the oil industry]. *STB Karotazhnik*, 2006, No. 5 (146), pp. 27-37.
9. Vaganov K.A., Pereverzev D.V. Produktsiya kompanii «Uraltekhnotrans» - dlya povysheniya produktivnosti neftyanykh i gazovykh skvazhin [The products from company "Uraltechnotrans" - to increase the productivity of oil and gas wells]. *Burenie i neft, Drilling and oil*, 2017, No. 1, pp. 36-37.
10. Volkov V.T., Yagodnikov D.A. Issledovaniye i stendovaya otrabotka raketnykh dvigateley na tverdom toplive [Research and bench testing of rocket engines on solid fuel]. Moscow: publishing house of MGTU named by N.Uh. Bauman, 2007, 296 p.
11. Barsukov V.D., Minkova N.P., Minkov S.L. Eksperimentalnaya ustanovka dlya stendovoy otrabotki gazogeneratorov, ispolzuyemykh pri razryve neftenosnykh plastov [Experimental installation for bench testing of gas generators used in the rupture of oil reservoirs]. *Proceedings of higher educational institutions. Oil and gas*, Tomsk, 1990, no. 12, pp. 49-53.
12. Rudenko V.L., Zamaruyev V.M., Falaleyev V.I. Raschet dlitelnosti goreniya porokhovyykh zaryadov v soplovykh ustanovkakh vysokogo davleniya [Calculation of the duration of combustion of propellant charge in the nozzle high pressure]. *Chemical Physics and Mesoscopies*, 2006, Vol. 8, No. 2, pp. 248-256.
13. Sadykov I.F., Mukhutdinov A.R., Arkhipov V.G. Ustroystvo dlya vskrytiya i obrabotki prizaboynoy zony skvazhiny [The device for opening and processing of the well zone]. Patent of the Russian Federation for the invention № 21149. publ. 10.07.1998.
14. Garifov K.M. Teoreticheskiye i eksperimentalnyye issledovaniya vozdeystviya na neftyanyye plasty porokhovyykh gazami [Theoretical and experimental studies of the impact of powder gases on oil reservoirs]. Kazan, 2001, 88 p.
15. Vaganov K.A. Ustroystvo dlya stendovoy otrabotki zaryadov tverdykh topliv [device for bench testing of solid fuel charges]. Patent for invention №2566852 of the Russian Federation, publ. 27.10.2015
16. Vaganov K.A., Bulbovich R.V. Mnogokanalnaya sistema izmereniy, obrabotki parametrov i upravleniya ispytatelnym stendom na platforme COMPACTRIO [Multichannel measuring system, processing options and control test stand on the platform COMPACTRIO]. *Sensors & Systems*, 2015, no. 3, pp. 41-46.
17. Burlov V.V., etc. Ballistika stvolnykh sistem [Ballistics of the receiver systems]. Moscow: Mashinostroenie, 2006, 461 p.

18. Aliyev A.V., etc. Vnutrennyaya ballistika RDTT [Internal ballistics solid propellant motors]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 504 p.

Об авторах

Ваганов Константин Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: k.a.vaganov@mail.ru).

Бульбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

About the authors

Konstantin A. Vaganov (Perm, Russian Federation) – PhD Student, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: k.a.vaganov@mail.ru).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dekan_akf@pstu.ru).

Получено 27.11.2018