

В.П. Нагорный, д.т.н.

И.И. Денисюк, к.т.н.

С.В. Петрушенк, асп.

(Институт геофизики НАН Украины)

ИМПУЛЬСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Приведені результати експериментальних досліджень поведінки пісковиків при динамічних навантаженнях. Розроблена секційна торпеда, застосування якої дозволяє підвищити дебіт видобувних свердловин.

PULSE TECHNOLOGY OF INTENSIFIED CARBOHYDRATE PRODUCTION

The results of the experimental study of sandstones behavior at the dynamic loading are presented. The sectional torpedo for increasing the yield of extracting wells is elaborated.

В процессе разработки нефтегазовых месторождений фильтрационные характеристики пород-коллекторов нефти и газа в призабойной зоне пластов (ПЗП) заметно ухудшаются, что снижает продуктивность скважин и степень освоения недр. Эффективным методом улучшения фильтрационного состояния пород в ПЗП являются использование химических кислот, поверхностно-активных веществ (ПАВ) и растворителей, вибро- и теплообработки, гидравлический разрыв пласта и др. Однако большинство из отмеченных методов требуют громоздкого оборудования, немобильны и не обеспечивают избирательное действие, в особенности, для маломощных пластов. Альтернативой названным методам является применение мощного импульсного воздействия на среду пласта, в результате чего создается дополнительная сеть каналов фильтрации в ПЗП.

Известно, что в результате взрыва изменяется физическое состояние горных пород, при этом в зоне взрывного воздействия возникает искусственная трещиноватость, приводящая к изменению начальной пористости массива.

При выборе рациональных параметров импульсного нагружения с целью повышения проницаемости пород в ПЗП необходимо, в первую очередь, иметь сведения о тех изменениях, которые происходят в массиве при его импульсном нагружении. Для этого поведение образцов горных пород в условиях импульсного нагружения исследуется в лабораторных условиях.

На основе экспериментальных исследований кернового материала образцов горных пород ПЗП при их динамическом нагружении определяются оптимальные условия разуплотнения структуры пород и амплитудные характеристики импульсного воздействия.

В работе [1] установлено, что развитие деформационных процессов в горных породах зависит как от их исходного физического состояния, так и в значительной мере от вида нагружения, характеризуемого параметром

$$\zeta = \sigma_3 / \sigma_1$$

где σ_3 и σ_1 – наименьшее и наибольшее главные напряжения.

В Институте геофизики НАН Украины под руководством докт.техн. наук Михалюка А.В. разработан экспериментальный комплекс для изучения поведения горных пород при динамическом нагружении. Методика проведения экспериментов, описание испытательной камеры и экспериментального комплекса подробно изложены в [1]. Экспериментальный комплекс обеспечивает создание в испытываемом образце породы сложного динамического напряженно-деформированного состояния с импульсным характером изменения всех компонент тензоров напряжений и деформаций. Комплекс позволяет в широких пределах изменять вид напряженного состояния образца при сжатии – от одноосного до всестороннего равномерного, что обеспечивается соотношением размеров рабочего пространства испытательной камеры и образца, наличием и отсутствием в камере жидкости, создающей давление на образец. Динамическое нагружение создается ударом свободно падающего груза в вертикальном копре 100-FU-122.

При проведении экспериментов непостоянство свойств образцов горных пород, условий выполнения экспериментов, расшифровки осциллографических записей, случайные погрешности в работе контрольно-измерительной аппаратуры оценивается с применением методов математической статистики [2]. Случайная ошибка измеряемой величины не превышает $\pm 5\%$ при выполнении трех экспериментов при одних и тех же параметрах динамического нагружения. Суммарная максимальная ошибка определения параметров напряженно-деформированного состояния образца не превышает $\pm 5,1 \dots 10,8\%$ [1].

Минимум искажающего влияния трения по торцам и продольного изгиба образца при его нагружении обеспечивается определенным отношением высоты испытываемых образцов h к их диаметрам d , изменяющимся в границах от 1,8 до 2,5. С учетом этого и объема испытательной камеры размеры испытываемых образцов следующие:

$$h \leq (7,0 \dots 7,5) \cdot 10^{-2} \text{ м}; \quad d \leq 5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Как отмечено в работе [3], образцы таких размеров для большинства горных пород могут рассматриваться как элементарные объемы породы.

При экспериментальном изучении деформирования образцов горных пород при динамическом нагружении основное внимание уделялось поведению пород в области давлений, сравнимых с прочностью пород, поскольку пространственная область более высоких давлений от взрыва заряда невелика по сравнению с общей зоной действия взрыва и достаточно изучена [4].

Результаты экспериментальных исследований песчаников, как наиболее характерных пород-коллекторов нефти и газа, при неравномерном динамическом их нагружении приведены в работах [1,5,6]. Физико-механические свой-

ства исследованных песчаников следующие: плотность $\rho = (2,26...2,54) \cdot 10^3$ кг/м³; пористость $n = 9...24\%$; скорость продольных волн $V_p = (2,38...2,61) \cdot 10^3$ м/с; коэффициент Пуассона $\nu = 0,18...0,25$; модуль Юнга $E = (1,24...1,65) \cdot 10^{10}$ Па; предел прочности при одноосном сжатии $\sigma_0 = (420...545) \cdot 10^5$ Па.

Некоторые результаты экспериментальных исследований приведены ниже.

Разуплотнение структуры песчаников при неравномерном динамическом нагружении, обусловленное увеличением объема естественной микротрещиноватости, зарождением и развитием новых трещин, сказывается на упругих, прочностных и деформационных характеристиках песчаников. Так, предел упругости с уменьшением показателя неравномерности нагружения ζ от 0,2 до 0,05 уменьшается в 2,8 раза (рис. 1). Заметное влияние неравномерность нагружения оказывает и на величину сцепления C . При изменении ζ от 0,3 до 0,05 величина сцепления C уменьшается в 1,32 раза (рис. 2).

Количество последовательных неравномерных динамических нагружений также влияет на характеристики исследуемых песчаников. С увеличением количества нагружений до 4 раз модуль Юнга E уменьшается в 1,35 раза (рис. 3), величина сцепления C уменьшается в 3,1 раза (рис. 4).

Следовательно, упругие (предел упругости), прочностные (сцепление) и деформационные (модуль Юнга) характеристики песчаников существенно зависят как от вида, так и от количества неравномерных динамических нагружений, что имеет большое значение для повышения эффективности взрывного воздействия на горный массив.

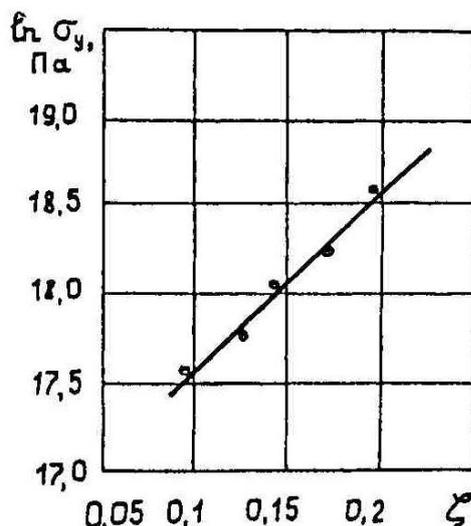


Рис. 1 – Влияние неравномерного нагружения на предел упругости

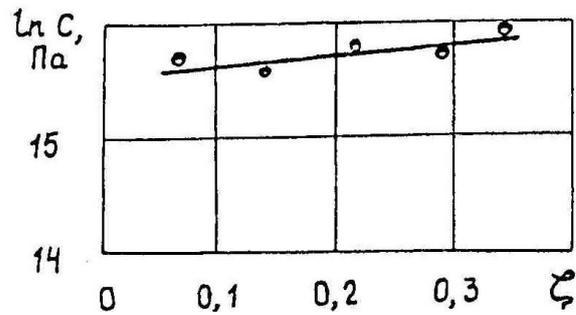


Рис. 2 – Влияние неравномерного нагружения на величину сцепления

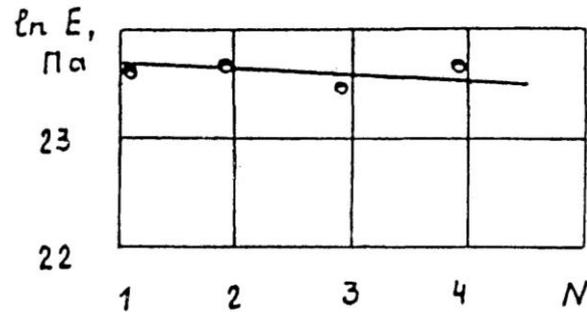


Рис. 3 – Влияние количества последовательных динамических нагружений на модуль Юнга

Таким образом, изменяя неравномерность напряженного состояния песчаников, можно достигать изменения его деформационных и прочностных характеристик в призабойной зоне пласта, что дает возможность эффективно управлять взрывом в технологических процессах интенсификации притока скважин различного целевого назначения.

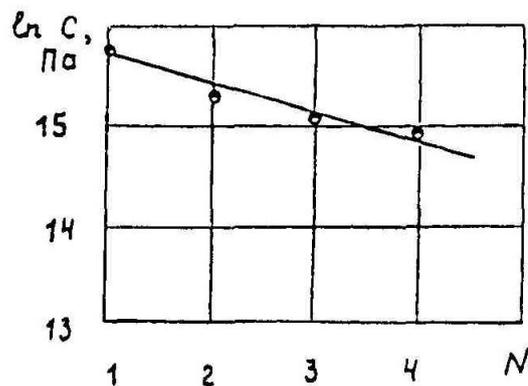


Рис. 4 – Изменение величины сцепления от количества последовательных нагружений

Для повышения разуплотняющего и разупрочняющего действия взрыва параметры нагружения необходимо выбирать таким образом, чтобы увеличить продолжительность напряженного состояния высокой неравномерности. При этом высокая степень неравномерности нагружения ($\zeta < 0,2$) сопровождается разуплотнением и разупрочнением структуры песчаников и в допредельной области нагружения [5].

Управлять видом напряженно-деформированного состояния в массиве ПЗП при взрыве можно за счет взаимодействия взрывных волн, распространяющихся в массиве при взрыве зарядов с некоторым замедлением один относительно другого.

Для реализации короткозамедленного взрывания зарядов в скважине разработана секционная торпеда и технология ее изготовления [7]. Суммарный заряд торпеды состоит из двух (или несколько) частей зарядов, взрыв которых с замедлением, обеспечивает возможность создания в массиве ПЗП неравномерного динамического нагружения. Необходимое время замедления частей зарядов в торпедо реализуется либо спецустройством, либо отрезком детонирующего шнура (ДШ). Заряды помещаются в специальную оболочку – корпус торпеды, предупреждающий разрушение торпеды при опускании ее в расчетный интервал обработки.

Основные параметры секционной торпеды:

- внешний диаметр торпед – $45 \pm 0,2$ мм;
- длина торпеды в сборе – 4460 ± 11 мм;
- плотность взрывчатого вещества (ВВ) в торпедо – $1450 \dots 1600$ кг/м³.

Секционные торпеды предназначены для взрывной обработки добычных скважин всех категорий для улучшения притоков флюидов при температуре до 65°C и давлении до 55 МПа и рассчитаны на однократное использование (для одного взрывания).

Взрывное разуплотнение структуры пород для улучшения фильтрационных характеристик массива в ПЗП применяется в тех скважинах, где:

- низкая начальная (природная) проницаемость и пористость песчаников в ПЗП;
- в результате длительной работы скважин загрязнение породы в ПЗП достигло значительных расстояний (3...5 м и более);
- применение традиционных методов обработки скважин (кислотные и тепловые, ПАВ, гидроразрыв и др.) не дали ожидаемого результата.

Условия применения взрывного метода разуплотнения структуры песчаников в ПЗП:

- пористость пород – 5...25%;
- мощность продуктивных пластов – 1,0...20,0 м и более;
- тип скважины – нефтяная, газовая и нагнетательная;
- конструкция скважин – с необсаженным и обсаженным стволом скважин, с удовлетворительным качеством цементации, возможна работа при опущенных насосно-компрессорных трубах;
- диаметр скважины – 114,3 мм и более;
- глубина скважин – до 5,5 км.

Промышленные внедрения разработанной импульсной технологии с применением секционных торпед для интенсификации добычи углеводородов свидетельствуют о ее высокой эффективности: дебит нефтяных скважин увеличивается в 1,5...2,0 раза, газовых в 5,0...10,0 раз (см. табл. 1, 2). Положительный эффект устойчив во времени – 1,5 года и более.

Таблица 1 – Параметры скважин, разработанных Институтом геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

№ п/п	Организация	№ скважины	Интервал, мм	Порода	Пористость, %	Тип скважины
1.	НАК «Нефтегаз» Украины (Украина)	109	4611-4616	песчаник	17,0	газовая
		53	4811-4818	песчаник	8,0-9,0	газовая
		60	3660-3867	песчаник	13,0-15,0	газовая
		40	2688-2756	доломит	17,0-23,0	газовая
		58	4942-4951	песчаник	17,0-19,0	газовая
		25	2227-2235	песчаник	12,0-14,0	газовая
		103	3314-3318	песчаник	14,0	газовая
		26	4112-4118	песчаник	11,0-13,0	нефтяная
		120	1450-1478	песчаник	25,0	нагнетательная
		1	2281-2300	песчаник	20,0	нагнетательная
2.	ОАО «Укрнефть» (Украина)	53	3622-3880	песчаник	16,0	нефтяная
		905	3839-4382	песчаник	18,0	нефтяная
		816	3848-3880	песчаник	10,0	нефтяная
3.	ПО «Юганскнефтегаз» (Россия)	587	2510-2525	песчаник	22,3	нефтяная
		612	2570-2583	песчаник	21,7	нефтяная
		688	2420-2436	песчаник	23,5	нефтяная
4.	ПО «Астраханьгазпром» (Россия)	112	1550-1573	песчаник	23,0	нагнетательная
		113	1545-1550	песчаник	25,2	нагнетательная

Разработанная технология с успехом может применяться для интенсификации добычи нефти, природного газа, шахтного метана, геотермального тепла, а также при газификации каменного угля и выщелачивании солей и редкоземельных элементов.

Таблица 1 – Результаты внедрения технологий повышения дебита скважин, разработанных Институтом геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины

№ п/п	Диаметр колонны, мм	Дебит до торпедирования		Дебит после торпедирования	
		т/сут	м ³ /сут	т/сут	м ³ /сут
1.	140,0	0,0	1000	30000	
	140,0			57000	
	140,0			20000	
	127,0			32000	
	139,7			50000	
	140,0			1850	
	139,7			45000	
	140,0			15,0	
	167,8			Приемистость скважины увеличилась в 7 раз	
	146,0			Приемистость скважины увеличилась в 4 раза	
2.	146,0	0,6		1,5	

	146,0	0,4		1,7	
	146,0	1,3		2,5	
3.	146,0	20,2		39,4	
	146,0	15,0		52,5	
	146,0	7,2		40,02	
4.	177,8			Приемистость скважины увеличилась в 6,2 раза	
	177,8			Приемистость скважины увеличилась в 7,9 раза	

Статья подготовлена по материалам доклада Международной научной конференции “Импульсные процессы в механике сплошных сред” (17-21 августа 2009, г. Николаев).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михалюк А.В. Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1980. – 154 с.
2. Пустыльник Е.М. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. – М.: Наука, 1968. – 288 с.
3. Руппенейт К.В., Либерман Ю.М. Введение в механику горных пород. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 356 с.
4. Механический эффект подземного взрыва /В.Н. Родионов, В.В. Адушкин, В.В. Костюченко и др. – М.: Недра, 1971. – 217 с.
5. Михалюк А.В. Торпедирование и импульсный гидроразрыв пород. – Киев: Наук. думка, 1986. – 207 с.
6. Михалюк А.В., Нагорный В.П. Неравномерное динамическое нагружение солевых и нерастворимых пород при сооружении подземных хранилищ в каменно-соляных структурах. – Киев: 1995. – 16 с. (Препр. НАН Украины Ин-т геофизики).
7. Пат. 23947 Україна, МПК E21B43/00. Секційна торпеда для вибухової обробки пласта /В.А. Даниленко, В.П. Нагорний, Л.О. Волгін, М.Г. Денисенко. Заявлено: 14.02.2007. Опубліковано: 11.06.2007р. Бюл. №8. – 3 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. К.К. Софійським 18.08.09