

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  $\sigma_3$  и  $\sigma_1$  – 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/м<sup>3</sup>; 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  $\zeta$  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  $\zeta$  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.

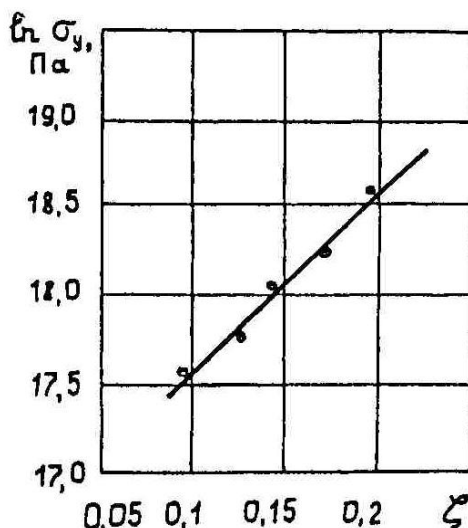


Рис. 1 – Влияние неравномерного нагружения на предел упругости

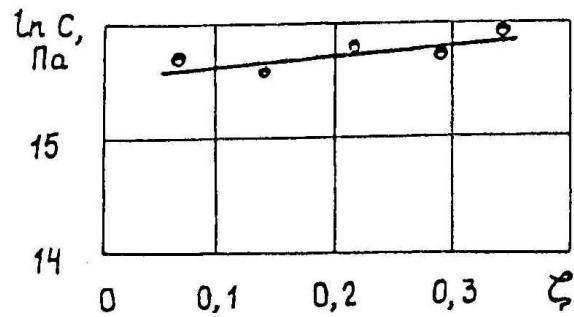


Рис. 2 – Влияние неравномерного нагружения на величину сцепления

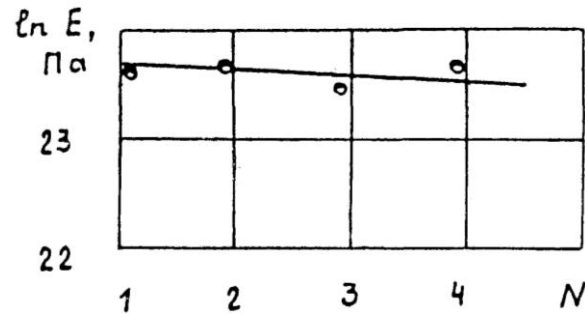


Рис. 3 – Влияние количества последовательных динамических нагружений на модуль Юнга

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.

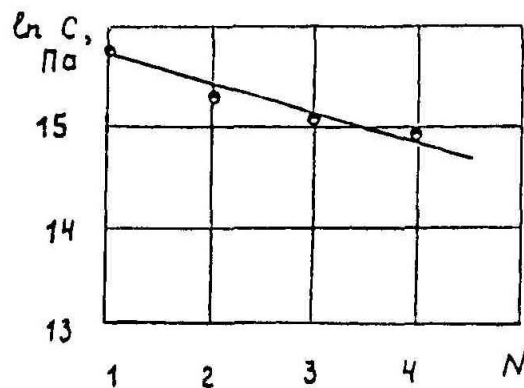


Рис. 4 – Изменение величины сцепления от количества последовательных нагружений

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 –  $4460 \pm 11$  мм;
- плотность взрывчатого вещества (ВВ) в торпедо –  $1450 \dots 1600$  кг/м<sup>3</sup>.

Секционные торпеды предназначены для взрывной обработки добычных скважин всех категорий для улучшения притоков флюидов при температуре до  $65^{\circ}\text{C}$  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 <sup>3</sup> /сут	т/сут	м <sup>3</sup> /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*