УДК 622.276.1

ФРАКТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К УВЕЛИЧЕНИЮ НЕФТЕОТДАЧИ ПЛАСТА

FRACTAL APPROACH TO INCREASE OIL RECOVERY

Васильев Николай Иванович
кандидат технических наук,
доцент кафедры теплоэнергетики и теплотехники,
Кубанский государственный
технологический университет

Даценко Елена Николаевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела
имени профессора Г.Т. Вартумяна,
Кубанский государственный
технологический университет
aldac@mail.ru

Орлова Инна Олеговна
кандидат технических наук,
доцент кафедры нефтегазового дела имени
профессора Г.Т. Вартумяна,
Кубанский государственный
технологический университет
assoletta77@mail.ru

Авакимян Наталья Николаевна
кандидат физико-математических наук, доцент,
доцент кафедры общей математики,
Кубанский государственный
технологический университет
avnatali@mail.ru

Лешкович Надежда Михайловна
старший преподаватель кафедры нефтегазового дела
имени профессора Г.Т. Вартумяна,
Кубанский государственный
технологический университет
aldac@mail.ru

Vasilyev Nikolay Ivanovich
The candidate tehn. Sciences;
Associate Professor, Department of
Thermal Engineering, Heat and Power,
Kuban State University of Technology

Datsenko Elena Nikolaevna
The candidate tehn. Sciences;
Associate Professor Department of
Oil and Gas named after Professor
affairs G.T. Vartumyana,
Kuban State University of Technology
aldac@mail.ru

Orlova Inna Olegovna
The candidate tehn. Sciences;
Associate Professor Department of
Oil and Gas named after Professor
affairs G.T. Vartumyana,
Kuban State University of Technology
assoletta77@mail.ru

Avakimyan Natalya Nikolaevna
Candidate of Physics and Mathematics
Science, Associate Professor;
Associate Professor, Department of
General Mathematics,
Kuban State University of Technology
avnatali@mail.ru

Leshkovich Nadezhda Mihaylovna
Senior Lecturer Department of
Oil and Gas named after
Professor G.T. Vartumyan,
Kuban State University of Technology
aldac@mail.ru

Аннотация. Проанализирован метод гидроразрыва пласта с применением фрактального подхода к описанию процесса разрушения горных пород. Показана кратковременная эффективность данного метода. С целью увеличения нефтеотдачи пласта предложен метод акустического воздействия на залежь.

Ключевые слова: фракталы, гидроразрыв пласта, трещины, коллектор, источники колебаний, амплитуда колебаний, нефтеотдача.

Annotation. The methods of hydraulic fracturing using fractal approach to the description of the process of destruction of rocks. It is shown that short-term efficacy of this method. In order to increase oil recovery method is proposed acoustic impact on the reservoir.

Keywords: fractals, hydraulic fracturing, cracks, collector, sources of vibrations, vibration amplitude, oil recovery.

В последнее время при изучении неупорядоченных систем весьма эффективно используются фрактально-геометрические методы [1, 2]. Поиск возможного применения фракталов в нефтегазовой отрасли является на сегодня актуальной задачей.

Фракталы нашли свое применение и в описании процесса разрушения горных пород. Был проанализирован популярный в наши дни метод увеличения добычи нефти «гидроразрыв пласта» (ГРП). Суть заключается в создании трещины в коллекторе (нефтегазосодержащем пласте) посредством закачки воды под большим давлением, что приводит к дальнейшему развитию трещин, по которым планируется приток флюида из более продуктивных участков к скважине [3]. Изучив процессы разрушения горных пород, был сделан вывод, что результатом является разветвленная система трещин (т.е. процесс нелиней-

ный и закон Гука не действует). Эксперименты проводились с двумя видами деформаций – растяжение и сдвиг, распространенных в природе и являющимися результатом применения ГРП.

Конфигурации трещин в обоих случаях имели фрактальную структуру с одинаковой размерностью 1,62–1,64. (В дальнейшем исследования проводились на компьютерной модели разрушения ГРП, основанной на теории фракталов). Вероятнее всего, можно предположить, что трещины окружат куски цельной породы, по которым будет постоянно циркулировать вода и таким образом блокировать выход нефти из них в проточную часть коллектора (рис. 1).

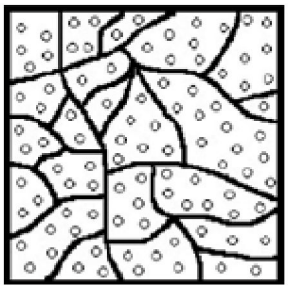

Рисунок 1 – Система трещин в поровом коллекторе

На практике нефтяной пласт обычно расчленяется нагнетаемой водой либо по системе существующих в нем трещин, либо по системе искусственно созданных в нем трещин при проведении гидроразрывов. Причем после гидроразрывов потоки воды канализируются от нагнетательных скважин в добывающие. Проводя глубоко проникающие гидроразрывы в пласт нефтяной залежи, мы заведомо создаем подземные протоки для воды, тем самым выключается подпитка их нефтью из разветвленной сети трещин. Повторное проведение гидроразрыва пласта в том же месте бессмысленно и даже вредно.

Выбрав легко добываемую нефть из трещинной емкости, мы консервируем запасы нефти в матричной части коллектора, которые взять потом будет весьма проблематично. Поэтому, осуществляя громадный водооборот через недра и неся большие нерентабельные затраты, мы получаем лишь малую толику нефти.

Кроме терригенных коллекторов нефти и газа существуют (~30 % от общего объема) карбонатные породы-коллекторы, флюидная емкость которых представлена кавернозно-трещинной пустотностью. Фрактальность коллектора и здесь играет ту же роль.

В итоге на месторождениях наблюдается кратковременный эффект увеличения добычи, но он ведет к консервированию нефтесодержащих частей горной породы. Таким образом, применив фрактальный подход к описанию процесса разрушения горных пород, можно сделать вывод о неоднозначности метода ГРП, являющегося одним из самых востребованных методов увеличения нефтеотдачи пласта в России.

Чтобы не оставлять в недрах большую часть нефти, заключенной в матричной ёмкости коллектора, целесообразно использовать сейсмические воздействия и волновые технологии.

Например, на поверхности земли вблизи устья добывающей скважины можно расположить источники колебаний одинаковой частоты и вблизи контура питания упомянутой скважины располагают источники колебаний одинаковой частоты, но большей частоты колебаний источников у устья добывающей скважины (рис. 2), осуществлять одновременное воздействие колебаниями всех источников на нефтяной пласт с интенсивностью, временем воздействия и интеференцией колебаний, обеспечивающими коагуляцию капель нефти в поровом пространстве нефтяного пласта с водой и направленное движение потока за счет разности частот источников колебаний к забою добывающей скважины, при этом стягивающий эффект направленного движения потока к забою добывающей скважины задают количеством источников упругий колебаний на контуре питания добывающей скважины [4].

Интенсивность колебаний в пласте в точке r определяется суммой амплитуд колебаний от источников 1 (вблизи устья скважины) и 2 (вблизи контура питания):

$$A = A_1\cos(\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 - \omega_1 t) + A_2\cos(\bar{\kappa}_2\bar{r}_2 - \omega_2 t), \qquad (1)$$

где A_1, A_2 – амплитуды колебаний пласта от источников 1 и 2, соответственно, м; $\bar{\kappa}_1$, $\bar{\kappa}_2$ и ω_1, ω_2 – волновой вектор (рад/м) и угловая частота (рад/с), f – число колебаний источников в секунду, $\bar{r}_1 = \overline{R_1} - \bar{r}$, $\overline{r_2} = \overline{R_2} - \bar{r}$.

Угловая частота и частота f связаны соотношением: $\omega = 2\pi \cdot f$.

После преобразований (для $A_1 = A_2$):

$$A = 2A_1\cos\frac{\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 + \bar{\kappa}_2\bar{r}_2 - (\omega_1 + \omega_2)\,t}{2}\cos\frac{\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 - \bar{\kappa}_2\bar{r}_2 - (\omega_1 - \omega_2)\,t}{2}. \qquad (2)$$

В частном случае, для $\omega_1 = \omega_2 = \omega$:

$$A = 2A_1\cos\left[\frac{\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 + \bar{\kappa}_2\bar{r}_2}{2} - \omega \cdot t\right]\cos\frac{\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 - \bar{\kappa}_2\bar{r}_2}{2}. \qquad (3)$$

Видно, что величина A изменяется в диапазоне $0 \le A \le 2A_1$ при переходе от узловой поверхности колебаний к поверхности пучностей:

$$\frac{\pi}{2} + \pi \cdot n \le \frac{\bar{\kappa}_1\bar{r}_1 - \bar{\kappa}_2\bar{r}_2}{2} \le 0 \pm \pi \cdot m, \qquad (4)$$

где $n = 0, 1, 2, 3, \ldots$; $m = n + 1$.

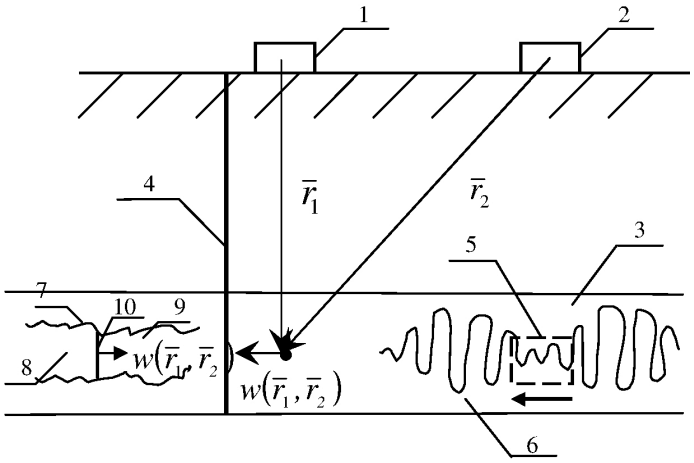

Рисунок 2 – Схема расположения источников акустического воздействия:
1, 2 – источники акустических колебаний; 3 – нефтяной пласт; 4 – скважина; 5 – узловая поверхность; 6 – поверхность пучностей; 7 – пора; 8 – вода; 9 – нефть; 10 – межфазная поверхность нефть-вода

На узловой поверхности суммарная амплитуда колебаний наименьшая, на поверхности пучностей наибольшая. Видно также, что интерференционная картина колебаний, определяемая из (4) узловыми поверхностями и поверхностями пучностей, стационарна.

В этом случае концентрация частиц нефти в эмульсии в узлах будет больше, чем в пучностях. Это можно показать следующим образом. Выделим поверхность, расположенную между узловой поверхностью и поверхностью пучностей, тогда в стационарном случае поток нефти через эту поверхность от пучностей к узлу будет равен обратному потоку – от узла к пучности:

$$c_y w_y = c_п w_п , \tag{5}$$

где $c_y , c_п$ – концентрация частиц нефти в эмульсии на узловых поверхностях и поверхностях пучностей, соответственно, 1/м^3; $w_y , w_п$ – нормальные к выделенной поверхности скорости частиц нефти в эмульсии, м/с.

Из (5) видно, что:

$$\frac{c_y}{c_п} = \frac{w_п}{w_y} , \tag{6}$$

а т.к. скорость частиц нефти в пучности много больше скорости частиц нефти в узле: $\frac{w_п}{w_y} >> 1$, то и $\frac{c_п}{c_y} >> 1$, т.е. частицы нефти в узловых поверхностях сближаются.

Применение фрактального подхода к разработке нефтегазовых месторождений даст возможность существенно увеличить нефтеотдачу на завершающих стадиях их эксплуатации.

Литература:

1. Шаймуратов Р.С. Гидродинамика нефтяного трещинного пласта. – М. : Недра, 1980. – 223 с.
2. Гачаев А.М. О фрактальной структуре нефтегазовых месторождений // Инженерный вестник Дона. – 2011. – Вып. № 1. – Т. 15.
3. Вадковский В.Н., Захаров В.С. Электронное учебное пособие «Динамические процессы в геологии: первое знакомство с нелинейными системами», 2001.
4. Патент № 2553122 РФ, МПК E21B 43/16 (2006.1) Способ интенсификации добычи нефти – 2014123079/03 заявл. 05.06. 2014. Опубл. 10.06.2015. Бюл. № 16.

References:

1. Shaymuratov R.S. Hydrodynamics of fractured oil reservoir. – M. : Nedra, 1980. – 223 p.
2. Gachaev A.M. On the fractal structure of the oil and gas fields // Engineering Don Gazette. – 2011. – Iss. № 1. – V. 15
3. Vadkovsky V.N., Zakharov V.S. Electronic textbook «Dynamic processes in geology: first exposure to nonlinear systems», 2001.
4. Patent № 2553122 of Russian Federation, the IPC E21V 43/16 (2006.1) A method for intensification of oil production – 2014123079/03 appl. 05.06. 2014. Publ. 10.6.2015. Bull. № 16.