



**ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СКАНИРОВАНИЯ
НЕФТЕНАСЫЩЕННОГО ПЛАСТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТРИЧНЫХ АНТЕННЫХ
РЕШЕТОК СКВАЖИННОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

А. П. Хмелинин, А. И. Конурин, М. И. Конурина

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: hmelinin@misd.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск, 630091, Россия*

Приведен обзор методов картирования нарушений в массиве горных пород на примере определения систем трещин гидроразрыва в нефтенасыщенном пласте. Рассмотрены методы пассивного и активного микросейсмического мониторинга, а также электромагнитные способы обследования массивов горных пород на предмет наличия в нем неоднородностей. Предложен перспективный вариант развития систем картирования трещин гидроразрыва — создание скважинных зондов, представляющих собой георадиолокатор, реализующий режим электрического сканирования исследуемого массива. Выполнен расчет антенной решетки скважинного исполнения на основе матрицы Батлера. Рассчитанные параметры фазированной антенной решетки с матрицей Батлера могут быть использованы для проектирования скважинного зонда для картирования трещин гидроразрыва, а также выполнения обследования инженерно-технических сооружений, например, оснований фундаментов зданий.

Гидроразрыв, микросейсмический мониторинг, фазированная антенная решетка, матрица Батлера, скважинный зонд, электрическое сканирование

**REASONING THE USE OF ELECTROMAGNETIC SCANNING
THE OIL-SATURATED SEAM BY BOREHOLE ANTENNAS ARRAY**

A. P. Khmelinin, A. I. Konurin and M. I. Konurina

*Chinakal Mining Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: hmelinin@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

An overview of methods for mapping disturbances in a rock mass is given on the example of determining systems of hydraulic fractures in an oil-saturated reservoir. Methods of passive and active microseismic monitoring, as well as electromagnetic methods for examining rock massifs for the presence of inhomogeneities in it are considered. A promising option for the development of hydraulic fracture mapping systems is proposed — the creation of borehole probes, which are a ground penetrating radar that implements the mode of electrical scanning of the studied massif. The calculation of the antenna array of the borehole design based on the Butler matrix is performed. The calculated parameters of a phased array antenna with a Butler matrix can be used to design a downhole probe for mapping hydraulic fractures, as well as to perform a survey of engineering structures, for example, building foundations.

Hydraulic fracturing, microseismic monitoring, phased antenna array, Butler matrix, borehole probe, electrical scanning

Ожидается, что к концу 2030 года потребление энергии во всем мире вырастет на 50% по сравнению с текущими уровнями. Этот рост может быть обеспечен как за счет возобновляемых ресурсов, так и за счет углеводородного сырья. Первичные и вторичные методы добычи нефти обычно дают только 15–30% исходной нефти, в зависимости от сжимаемости флюидов и начального давления коллектора [1].

Гидравлический разрыв пласта используется для повышения продуктивности скважины путем закачки жидкости под давлением в выбранную зону пласта. Повышенное давление вызывает образование новых или увеличение существующих трещин в этой зоне. Для предотвращения полного их закрытия перед остановкой закачки жидкости в трещины обычно помещается проппант. Таким образом, проппант удерживает трещины открытыми, создавая пористый проницаемый путь, открытый для потока жидкости из пласта-коллектора в ствол скважины. Извлекаемые флюиды, такие как нефть, газ или вода, затем через скважину выкачиваются на поверхность.

Несмотря на долгую историю гидравлического разрыва пласта, рост трещин с течением времени изучен недостаточно. Информация о геометрии созданной системы трещин гидроразрыва в пласте-коллекторе имеет существенное значение для управления добычей: для проектирования будущих скважин, выбора типа и расчета количества проппанта и т. д. Таким образом, существует потребность в точном картировании трещин. Обычно используемые методы включают анализ давления и температуры, анализ наблюдений с помощью сейсмических датчиков, микросейсмический мониторинг образования трещин во время процессов гидроразрыва. У каждого из этих методов есть свои преимущества и недостатки.

Для картирования индуцированных трещин в типичных системах гидроразрыва пласта массивы микросейсмических приемников располагаются на поверхности или размещаются в забое скважины (рис. 1) и конфигурируются для регистрации “хлопков”, которые возникают, когда индуцированные трещины сдвига пересекаются с существующими естественными трещинами. Высвобождение энергии, связанное с толчками или сейсмическими событиями, регистрируется через распространение упругих волн к массиву геофонов (например, приемников), которые используются для триангуляции местоположения события или гипоцентра. Сейсмические данные собираются и выполняются расчеты для определения местоположения источника сейсмической активности.

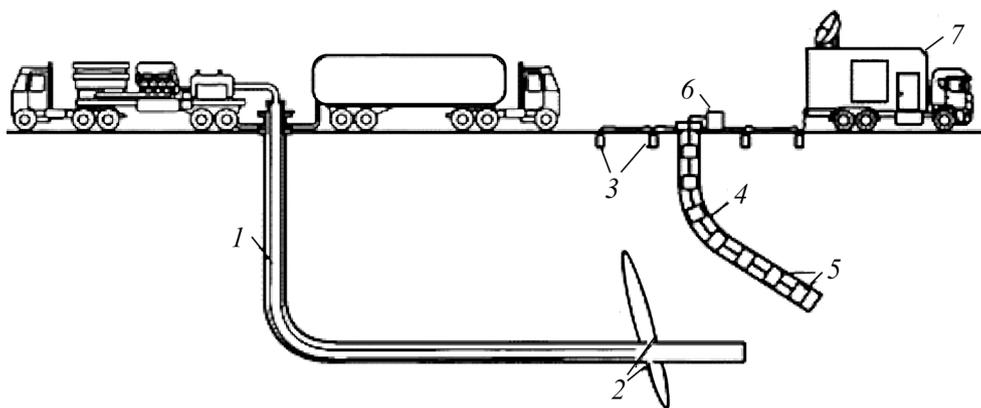


Рис. 1. Измерения микросейсмических колебаний во время гидравлического разрыва нефтяных и газовых скважин: 1 — скважина; 2 — трещина гидроразрыва; 3 — поверхностные сейсмоприемники; 4 — мониторинговая скважина; 5 — скважинные сейсмоприемники; 6 — концентратор; 7 — оборудование обработки данных

Существует высокая степень неопределенности в измерении микросейсмической активности из-за невозможности знать априори, когда произойдет событие разрушения. Такой

подход к сейсмическому мониторингу известен как пассивный микросейсмический мониторинг, в котором термин пассивный относится к отсутствию контролируемого ввода энергии. Поскольку нет контролируемого ввода энергии, время возникновения события сдвига неизвестно. Таким образом, в системе уравнений появляется больше неизвестных, и проблема ее разрешения становится более сложной.

Известен также способ измерения микросейсмических колебаний с применением активных излучателей во время гидравлического разрыва нефтяных и газовых скважин для оценки геометрии индуцированной трещины (рис. 2). Доступны различные сенсорные матрицы для измерения микросейсмических явлений в скважинах. Микросейсмические колебания, вызванные гидроразрывом пласта, обычно контролируются: массивами датчиков на поверхности с собственной частотой 4.5 Гц, массивами скважинных датчиков на собственной частоте 10–15 Гц, 3-компонентными оптоволоконными распределенными акустическими сенсорными кабелями и т. д. [2–4].

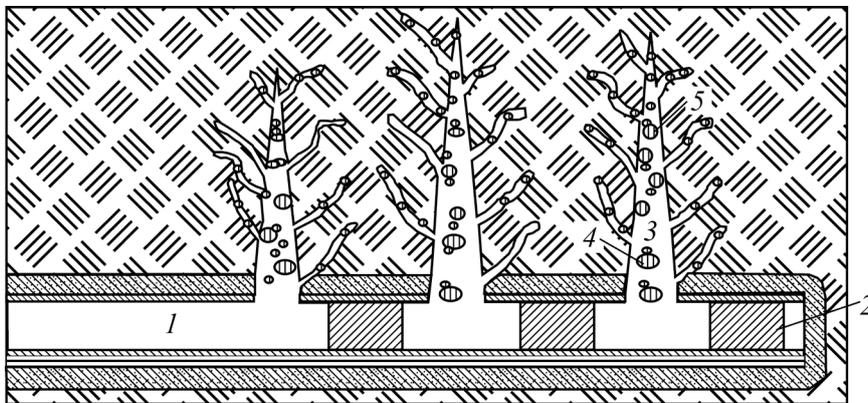


Рис. 2. Активный способ измерения микросейсмических колебаний: 1 — скважина; 2 — пакер; 3 — трещина; 4 — излучатель; 5 — проппант

Улучшение качества датчиков и увеличение их количества, безусловно, полезно для определения характеристик и геометрии трещины гидроразрыва. Более точные результаты могут быть при следующих условиях: расположение сейсмоприемников ближе к сейсмособытиям, снижение уровня фонового шума, увеличение количества датчиков для суммирования измеренных микросейсмических событий; увеличение отношения сигнал / шум приемного оборудования и т. д. [5]. Существует множество алгоритмов, позволяющих фильтровать шумы и фиксировать микросейсмические события в реальном времени во время операций по гидроразрыву пласта. Тем не менее, эти методы все еще ограничены и не могут отобразить конфигурацию и пространственную ориентацию закрепленной трещины с высокой степенью достоверности [6].

Общим недостатком указанных методов является в том числе сложная декомпиляция полученных данных, зависимость от неопределенных параметров, измерение формы трещин во время формирования (а не после закрытия или во время добычи), картирование трещин, которые могут не иметь выхода к стволу скважины, акустический “шум” от процедур гидроразрыва и неспособность различать сейсмические события, вызванные образованием трещин и другими процессами.

Другой способ мониторинга трещин гидроразрыва включает размещение чувствительных измерителей наклона, которые действуют как уровень для измерения движения земной поверхности из-за расширения и смещения подземных пластов из-за введения жидкости под давлением и возникающей в результате сети искусственных трещин.

Еще один способ предполагает добавление к жидкости для гидроразрыва пласта радиоактивных изотопов и последующий контроль с помощью гамма-спектрометрии. Однако при таком подходе в почву вносятся дополнительно потенциально опасные вещества. Патент США US 7705294, описывает устройство, которое измеряет рентгеновские лучи, рассеянные в обратном направлении от внутренних слоев ствола скважины в выбранных радиальных направлениях, при этом недостающие сегментные данные заполняются посредством движения устройства через ствол скважины. Устройство позволяет генерировать данные для двумерной реконструкции скважины или ствола скважины. Патент США № 4415805 раскрывает метод оценки операции многостадийного гидроразрыва путем закачки различных радиоактивных индикаторов на каждой стадии гидроразрыва.

Перспективным направлением развития систем картирования трещин гидроразрыва является создание скважинных зондов для георадиолокационного обследования массива как в процессе, так и после проведения гидроразрыва пласта. Метод георадиолокации широко применяется в инженерной геологии для исследования массивов горных пород, а также в горном деле для геофизического обеспечения методов определения напряжений в породных массивах [7].

Управлять направлением сканирования можно за счет применения антенных решеток — антенн, содержащих совокупность излучающих элементов, расположенных в определенном порядке, ориентированных и возбуждаемых так, чтобы получить заданную диаграмму направленности.

Существует два способа обеспечения сканирования антенной решеткой. В первом способе движение луча обеспечивается механическим перемещением частей антенной решетки, изменяя направление главного максимума в пространстве или форму диаграммы направленности. Достигается это за счет изменения геометрической формы возбуждающего радиоволнового элемента или путем вращения всей антенной решетки. Такие системы весьма сложны как для построения с учетом геометрии скважины, так и для эксплуатации.

Второй способ заключается в электрическом управлении амплитудно-фазовым распределением токов или полей на излучающих элементах. Такой способ управления положением диаграммы направленности называется электрическим сканированием, а антенная система — фазированной антенной решеткой.

Структурная схема многолучевой антенны включает излучающую часть (решетка излучателей или раскрыв апертурной антенны), диаграммообразующее устройство — основной элемент функциональной схемы, создающие требуемые поля в излучающей части, и входы антенны в виде поперечных сечений линии передачи с единственным распространяющимся типом волны.

В настоящее время известно большое количество практических схем матричных антенных решеток. Наиболее распространенными являются антенные решетки на основе параллельной диаграммообразующей системы (матрица Батлера) и последовательной (матрица Бласса).

В настоящей работе выполнен расчет антенной решетки скважинного исполнения на основе матрицы Батлера [8–10].

Схема диаграммообразующей системы на основе матрицы Батлера с параллельным питанием соединяет $2n$ элементов решетки с равным количеством портов лучей. Основными

элементами системы являются чередующиеся ряды гибридных соединений и фиксированных фазовращателей. Классическая схема Батлера показана на рис. 3.

Фактически, матрица Батлера является эквивалентом аналоговой цепи быстрого преобразования Фурье, следовательно, диаграммообразующее устройство имеет минимальное число компонентов и минимальные электрические длины [11, 12].

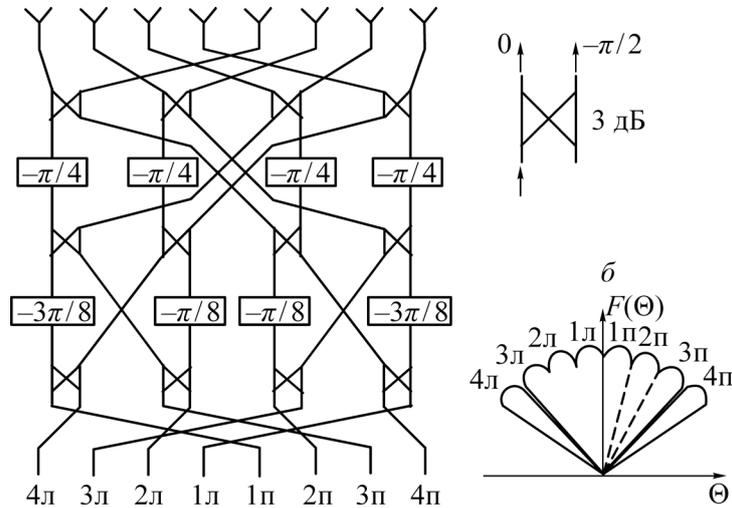


Рис. 3. Структурная схема многолучевой антенны на основе матрицы Батлера

Основным элементом матрицы Батлера является четвертьволновый полосковый направленный ответвитель (рис. 4).

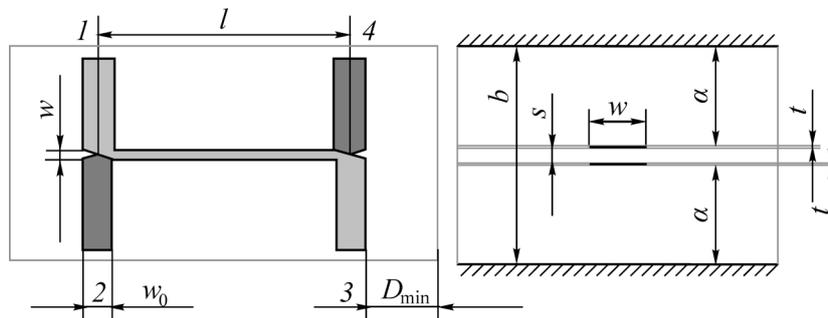


Рис. 4. Размеры направленного ответвителя [13]

Произведем расчет параметров полоскового направленного ответвителя.

Линии передачи формируются на обеих сторонах изначально двухсторонне фольгированной диэлектрической пленки. Значения рабочей частоты, а также параметров затухания приняты с учетом результатов, представленных в [14].

Исходные данные:

- $f_0 = 1$ ГГц — рабочая частота;
- $\rho_0 = 50$ Ом — волновое сопротивление подводящих линий;
- $S_{21} = 3$ дБ — переходное затухание направленного ответвителя.

Основным материалом для работы был выбран фольгированный фторопласт (ФАФ-4Д) с параметрами:

- $t = 0.035$ мм — толщина фольги;
- $\alpha = 1.43$ мм — толщина изолирующего диэлектрика;

— s — толщина пленки;

— $\varepsilon_r = 2.5$ — диэлектрическая проницаемость подложки.

Расчет размеров направленного ответвителя производился согласно [12].

Расстояние между пластинами корпуса $b = (2.965 + s)$ мм.

При толщине пленки 0.33 мм расстояние между пластинами корпуса составит 3.295 мм.

Длина волны $\lambda = c / f_0 = 0.30$ м, где c — скорость света в вакууме.

Длина полоска направленного ответвителя $l = \lambda / (4\sqrt{\varepsilon_r}) = 0.0236$ м.

Ширина полоска направленного ответвителя $w = 0.44b = 0.0026$ м.

Ширина подводящих линий $w_0 = 0.81b = 0.0048$ м.

Минимальное расстояние между корпусом и ближайшей линией $D_{\min} = 2b = 0.0118$ мм.

Выходные контакты матрицы Батлера для сочленения с излучателями должны быть размещены на расстоянии половины длины волны в воздухе $l_{\text{вых}} = \lambda / 2 = 0.0188$ м.

ВЫВОДЫ

Расчитанные параметры 4-лучевой фазированной антенной решетки с матрицей Батлера могут быть использованы для проектирования скважинного зонда для картирования трещин гидроразрыва нефтенасыщенных пластов, а также при обследовании массивов горных пород и инженерно-технических сооружений на предмет выявления скрытых дефектов – трещин, областей разуплотнения и участков с нарушениями сплошности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Tzimas E.** Enhanced oil recovery using carbon dioxide in the european energy system, European Commission Joint Research Center, 2005. — P. 21–22
2. **Aki K. and Richards P.** Quantitative seismology: theory and methods, Vol. 1, Moscow, Nedra, 1983, 520 p. (in Russian) [**Аки К., Ричардс П.** Количественная сейсмология: теории и методы. — Т. 1. — М.: Мир. 1983. — 520 с.]
3. **Duchkov A. A., Stefanov Y. P., Yaskevich S. V., and Bakeev R. A.** Geomechanic modeling of seismic wave generation and approximation by effective seismic point sources, Extended Abstracts, 77th EAGE Conference & Exhibition, 2015, Vol. 15, No. 108. — P. 1–4 (CD ROM).
4. **Kayal D. R.** Hydraulic fracturing and microseismicity: global prospects in oil exploring, Georesursy, 2017, Vol. 19, Is. 3, P. 1. — P. 222–228 (in Russian) [**Каял Д. Р.** Гидроразрыв и микросейсмичность: глобальные перспективы в разведке и добыче нефти // Георесурсы. — 2017. — Т. 19. — № 3. — Ч. 1. — С. 222–228. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.19.3.12>]
5. **Li J., Kuleli S. H., Zhang H., and Toksöz M. N.** Focal mechanism determination of induced microearthquakes in an oil field using full waveforms from shallow and deep seismic networks. Geophysics. 2011. 76(6). Doi: 10.1190/GEO2011-0030.1
6. **Kolarov M. F.** Constructing the spatial images of cracks by alternative methods of micriseismic monitoring of seam hydraulic fracturing, Bulletin of Kuzbass State Technical University, 2017, No. 4. — P. 20–28. (in Russian) [**Коларов М. Ф.** Построение пространственных изображений трещин при использовании альтернативных методов микросейсмомониторинга гидроразрыва пласта // Вестн. КузГТУ. — 2017. — № 4 (122). — С. 20–28.]
7. **Kurlenya M. V., Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., Gakhova L. N., Kachalsky V. G., and Khmelinin A. P.** Development and improvement of borehole methods for estimating and monitor-

- ing stress-strain behavior of engineering facilities in mines, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55, No. 4. — P. 682–694. (in Russian) [Курленя М. В., Барышников В. Д., Барышников Д. В., Гахова Л. Н., Качальский В. Г., Хмелинин А. П. Разработка и совершенствование скважинных методов оценки и контроля напряженно-деформированного состояния инженерных горных сооружений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 182–195.]
8. **Bhowmik W. and Srivastava S.** Optimum design of a 4x4 planar butler matrix array for wlan application, *J. Telecommunications*, 2010, Vol. 2, Issue 1. — P. 68–74.
 9. **Slomian I., Wincza K., Staszek K., and Gruszczynski S.** Folded single-layer 8 × 8 Butler matrix, *J. of Electromagnetic Waves and Applications*, 2017, Vol. 31, Issue 14. — P. 1368–1398.
 10. **Pat. 2623836 RF.** Scanning aperture hybrid receiving-transmitting antenna, G. A. Morozov, T. I. Sukhacheva, A. G. Yanchenko, *Byull. Izobret.*, 2017, No. 19. [Пат. 2623836 РФ. Сканирующая апертурная гибридная приемно-передающая антенна / Г. А. Морозов, Т. И. Сухачева, А. Г. Янченко // Опубл. в БИ. — 2017. — № 19].
 11. **Pat. 2654994 RF.** Receiving multibeam active phase antenna array, A. G. Efimov, A. G. Kamenov, I. V. Chernov, *Byull. Izobret.*, 2018, No. 15 [Пат. 2654994 РФ. Приемная многолучевая активная фазированная антенная решетка / А. Г. Ефимов, А. Г. Каменев, И. В. Чернов. // Опубл. в БИ. — 2018. — № 15].
 12. **Pat. 2649096 RF.** Multibeam antenna system with one out, V. G. Markin, A. V. Zhuravlev, V. A. Shuvaev, E. M. Krasov, O. Yu. Makarov, *Byull. Izobret.*, 2018, No. 10 [Пат. 2649096 РФ. Многолучевая антенная система с одним выходом / В. Г. Маркин, А. В. Журавлев, В. А. Шуваев, Е. М. Красов, О. Ю. Макаров // Опубл. в БИ. — 2018. — № 10].
 13. **Gorbachev A. P. and Parshin Yu. N.** Design of a 4-beam printed phased antenna array with a Butler matrix, *Proc. of the Russian higher school Academy of sci.*, 2019, No. 3 (44). — P. 34–47. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-34-47 (in Russian) [Горбачев А. П., Паршин Ю. Н. Проектирование 4-лучевой печатной фазированной антенной решетки с матрицей Батлера // Докл. акад. наук высш. шк. РФ. — 2019. — № 3 (44). — С. 34–47].
 14. **Khmelinin A. P., Khmelinin D. P., and Konurina M. I.** Calculating the potential action radius of borehole GPR and its power to determine geometrical parameters and spatial position of hydraulic fracturing cracks in rock mass, *Fundamental and Applied Min. Sci.*, 2016, Vol. 2, No. 3. — P. 169–176. (in Russian) [Хмелинин А. П., Хмелинин Д. П., Конурина М. И. Расчет потенциальной дальности действия скважинного георадиолокатора и его номинальной мощности для определения геометрических параметров и пространственного положения трещин гидравлического разрыва в массиве горных пород // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 169–176].