

18. Шевелев Г.А., Кулинич В.С. Буримость как метод оценки механических свойств выбросоопасных зон в массиве песчаника // Уголь. - 1974. - № 12. - С. 38-41.

19. 3. Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Егоров С.И. Методы и средства определения параметров геомеханического состояния газоносного породного массива. - Донецк. ЦБНТИ, 1994. - 202 с.

20. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Лукинов В.В., Радченко В.В., Заболотный А.Г., Шевелев Г.А., Иванчишин С.Я., Кулинич С.В., Курносоев С.А., Подтуркин Д.Г. Закономерность изменения газовой проницаемости горных пород при переходе их из равнокомпонентного объемного напряженного состояния в разнокомпонентное. – Научные открытия (Сб. кратких описаний научных открытий, научных идей, научных гипотез – 2005) , дипл. № 280: Изд. «Сударыня», С.-Пет., М. – 2006.

21. Перепелица В.Г., Кулинич В.С., Шевелев Г.А., Кулинич С.В. Изменение газовой проницаемости в напряженных горных породах // Уголь Украины. – 2006. - № 3. – С. 33-35.

УДК 622.411.332.023:537-962

Академик НАН Украины,
д-р техн. наук, проф. А.Ф. Булат,
канд. техн. наук С.Ю. Макеев,
канд. техн. наук В.И. Лойк,
инж. В.Я. Осенний,
канд. техн. наук С.Ю. Андреев
(ИГТМ НАН Украины),
мл. науч. сотр. А.С. Баскевич (ДГХТУ)

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МЕТАНОСОДЕРЖАЩИХ Породах в результате СВЧ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Приведено результати експериментальних досліджень по руйнуванню зразків пісковика і алевроліту при впливі на них енергією надвисоких частот. Встановлені характерні закономірності зміни структурних властивостей цих гірських порід.

STRUCTURAL CHANGES IN ROCKS CONTAINING METHANE, AS A RESULT OF INFLUENCE BY ENERGY OVER HIGH-FREQUENCIES

The results of experimental researches on destruction of sandstones, claystones and siltstones samples at influence on them by an over high-frequencies are given. The characteristic conformities of these rocks structural properties changes are set.

Эффективность способов воздействия на углеводородные залежи зависит от глубины изменения внутренней структуры вещества, на которое направлено это воздействие. Особенно важно изменение сорбционного объема пород (угля), если таковой имеется. Для вмещающих пород надо учитывать, что определяющими факторами газоносности песчаников являются пористость и проницаемость, а в меньшей степени – сорбционная метаноемкость. Для аргиллитов и алевролитов, наоборот, наиболее существенна сорбционная метаноемкость.

Выполненные ранее исследования по электроразрядному разрушению горных пород с целью их дегазации [1] показали, что этот способ рационально применять на песчаниках и неэффективно использовать для алевролитов и аргиллитов. Что касается последних, то нижеприведенные исследования демонст-

рируют, что как раз СВЧ воздействие наиболее приемлемо для такого типа пород.

Благодаря широкому использованию микроволновой техники устройства, работающие на базе бытовых магнетронов, очень дешевы, а их применение в нефтяной и газовой отрасли с этой точки зрения эффективно.

Мощное микроволновое излучение все чаще используется для прогрева и очистки призабойной зоны скважин: плавления газогидратных и парафиновых пробок с целью повышения извлечения газового конденсата, нефтеотдачи и увеличения производительности скважин.

СВЧ воздействие можно применить и для метанугольных сред. Это видно из следующих факторов, влияющих на структурные особенности угля и пород, а значит и на газовыделение из них [2]:

- происходит не только поверхностный, но и объемный нагрев среды. Это позволяет достигать высокой скорости и эффективности обработки значительной массы вещества;

- подбирая параметры излучающей системы, можно осуществить избирательное выделение почти всей передаваемой СВЧ излучением энергии в ту область среды, которую необходимо нагреть. Нагревается при этом либо жидкая фаза (нефть, газовый конденсат, вода), либо твердая (горная порода, кольматант в скважинах, призабойной зоне, коллекторе и т.п.).

Целенаправленное дистанционное нагревание приводит к разрушению газовых гидратов и парафиновых пробок и к очистке скважины в местах засорения. Это можно осуществлять с помощью малогабаритного СВЧ генератора, который опускается в призабойную зону скважины. В случае применения устройства на газовых месторождениях возможно использование одного мощного СВЧ излучателя для группы скважин.

Известно, что при взаимодействии мощного электромагнитного излучения с горными породами СВЧ энергия преобразуется в тепло. Проведенные ранее лабораторные эксперименты [3] были направлены на совершенствование процесса электротермического разрушения и тесно связаны с формированием температурных полей и их оптимальным распределением в горных породах. Исследования показали, что при облучении ряда пород-диэлектриков СВЧ энергией значения температур внутри образца не убывают по экспоненте по мере удаления от поверхности, как это наблюдается при традиционном поверхностном тепловом облучении, а имеют максимумы в глубине образцов. Следовательно, внутри этих горных пород интенсивность излучения повышается.

В настоящей работе процесс воздействия электромагнитных волн СВЧ диапазона на песчаник и алевролит, отобранные при бурении скважины МС-599 шахты им. А.Ф. Засядько, исследовался в лабораторных условиях облучением пород посредством прямоугольного волновода (рис. 1а). Максимальная мощность генератора СВЧ энергии составляла 3,5 кВт при длине волны $\lambda = 12,63$ см (частота $f = 2375$ МГц). Исследованию подвергались цилиндрические образцы в виде кернов (рис. 1б). Диаметр образцов – 55-75 мм, длина – 70-85 мм.

Образцы песчаника облучались в цилиндрическом металлическом резонаторе диаметром 105 мм и длиной 70 мм. Он используется для концентрации электромагнитной энергии в образце. Выбор определенного соотношения между размерами резонатора и длиной волны позволяет получить в полости резонатора стоячие волны необходимого типа. Время облучения составляло 10 минут при мощности 3,5 кВт. Растрескивание образцов начиналось через 5 минут, а окончательный раскол – через 10 минут. Характер раскола образца приведен на рис. 2а.



а



б

а) СВЧ-излучатель и аппаратура для замеров режимных параметров воздействия

б) исследуемый керн на выходе прямоугольного волновода СВЧ-излучателя

Рис. 1 – Установка для СВЧ разрушения горных пород

Образцы алевролита облучались в открытом диэлектрическом резонаторе. Время облучения 3 минуты при мощности – 0,9 кВт. После чего с торца керна в сторону волновода началось расслоение породы на диски. Картина разрушения приведена на рис. 2б.



а



б

а – песчаник; б – алевролит

Рис. 2 – Типичное разрушение керна песчаника и алевролита в результате СВЧ обработки

Разрушенные образцы пород в дальнейшем были подвергнуты рентгеноструктурному анализу для определения возможного изменения состава и свойств минеральных включений.

Для каждого исследуемого типа пород получены рентгеновские дифрактограммы. Так, на рис. 3 приведена дифрактограмма необработанного материнского образца песчаника. Сравнение с аналогичной дифрактограммой разрушенного СВЧ воздействием образца песчаника (рис. 4) позволяет судить об изменении структурных параметров горной породы.

Анализ рентгенограмм осуществлялся по методикам [4, 5] на комплексе ДРОН-3 в монохроматизированном Co-K_α излучении с длиной волны $\lambda = 1,7902 \text{ \AA}$ при напряжении на аноде 30 кВ и токе трубки 20 мА. Расшифровка фазовых составляющих пород проводилась с использованием данных картотеки [6].

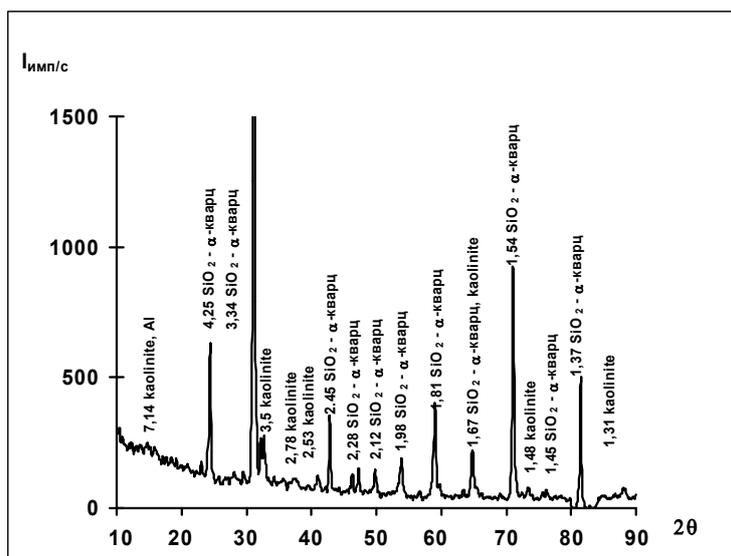


Рис. 3 – Рентгеновская дифрактограмма материнского образца песчаника, залегающего в кровле пласта m_3 шахты им. А.Ф. Засядько

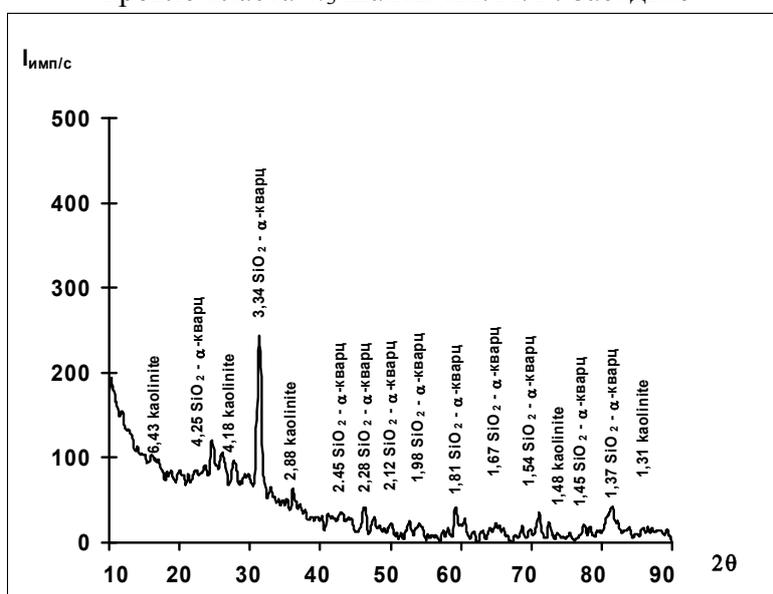


Рис. 4 – Рентгеновская дифрактограмма разрушенного СВЧ воздействием образца песчаника, залегающего в кровле пласта m_3 шахты им. А.Ф. Засядько

Расшифровкой дифрактограмм установлено: в исходном образце песчаника присутствовали α -кварц и каолинит в количестве 60 % и 30 % соответственно. α -кварцу соответствуют межплоскостные расстояния 4,25; 3,34; 2,45; 2,28; 2,12; 1,98; 1,81; 1,67; 1,54; 1,45; 1,37, а каолиниту – 7,14; 3,50; 2,78; 2,53; 1,67; 1,48; 1,31.

В результате СВЧ обработки песчаника температура образца достигла температуры плавления, а после охлаждения и частичной кристаллизации α - SiO_2 в образце появилась аморфно-кристаллическая фаза с присутствием α -кварца. После термообработки высоты дифракционных пиков α -кварца резко уменьшились, и размеры кристаллитов также изменились с 1308 Å до 577 Å. После СВЧ воздействия в песчанике в результате структурных превращений каолинит разложился на α - SiO_2 и α - Al_2O_3 , а количество α -кварца возросло до 88 %. Из-

менились параметры элементарной ячейки кварца: в материнской породе $d = 4,9127 \text{ \AA}$, $c = 5,4458 \text{ \AA}$, в обработанном образце $d = 4,9358 \text{ \AA}$, $c = 5,4030 \text{ \AA}$.

Анализ характера трещинообразования в образцах облученных горных пород позволил установить следующее.

При СВЧ облучении горных пород ограниченного размера (кернов) вдоль направления распространения электромагнитных волн образуются одна или несколько обособленных зон, в которых происходит интенсивное поглощение электромагнитной энергии. По форме эти зоны представляют собой вытянутые эллипсоиды вращения. Глубина локализации поглощающих зон в основном не превышает длины волны СВЧ излучения и составляет для песчаников 20-30 мм, алевролитов – 50-60 мм.

Области интенсивного поглощения электромагнитной энергии становятся высокотемпературными внутренними источниками тепла и приводят к разрушению горных пород. В зависимости от свойств пород наблюдались следующие основные разновидности процесса разрушения, соответствующие последовательным фазовым превращениям внутреннего источника тепла:

- разрушение осуществляется жидкой фазой внутреннего источника – расплавом, нарушающим сплошность образца и выходящим по образовавшимся трещинам наружу (рис.2а);

- внутренний источник находится в твердом состоянии, и разрушение происходит за счет напряжений, создаваемых давлением испаряющейся влаги, продуктов диссоциации, а также теплового расширения источника (рис.2б).

Образованию трещин и выходу их на поверхность образцов с большой скоростью сопутствуют динамические эффекты. Медленный темп ввода энергии позволяет проплавливать образцы, не нарушая их сплошности, ускорение же приводит к раскалыванию образцов.

В песчанике воздействие СВЧ приводит к переходу внутреннего источника тепла в жидкую фазу, движению ее к поверхности образца с образованием проплавленного канала, выходу расплава на поверхность и образованию кратера (рис.2а).

При мощности СВЧ излучения 3,5 кВт в песчанике происходит сравнительно медленное развитие внутренних источников тепла. На разрушение образцов затрачивается до 10 минут. В то же время на меньших уровнях мощности (0,9 кВт) при разрушении алевролита время, затрачиваемое на разрушение образцов, сокращается до 3 минут. Здесь на малых уровнях мощности значительная часть энергии тратится только на нагрев внутреннего источника в твердой фазе и его тепловое расширение с ростом температуры. В песчанике же на больших уровнях мощности тепловая энергия затрачивается на расплав породы, что приводит к дополнительному увеличению времени воздействия вплоть до стадии разрушения. В этом случае горная порода разрушается в основном за счет увеличения в объеме жидкой или газообразной фазы.

Локализация области нагрева зависит от длины волны. Взаимодействие электромагнитных волн СВЧ диапазона с горными породами, как правило, приводит преимущественно к локализации энергии в одной ограниченной области.

Она образуется в пучности стоячей волны на некотором расстоянии от поверхности образца [7]. Проплавленные в ряде образцов каналы можно объяснить движением локальной области по образцу в направлении СВЧ генератора. Такие режимы сопровождаются минимальными потерями энергии и являются наиболее экономичными применительно к процессам разрушения.

Определенный вклад в развитие высокотемпературных внутренних областей тепла в горных породах вносят факторы, связанные с конечными размерами и формой образцов. В результате возникают стоячие волны. Сложные интерференционные процессы и изменение амплитуды поля в нелинейных горных породах могут описываться периодическими функциями.

Таким образом, взаимодействие электромагнитных волн СВЧ диапазона с горными породами-диэлектриками может приводить к концентрации энергии в глубине породы, в результате чего развиваются внутренние области тепла, оказывающие на горные породы разрушающее воздействие.

В реальных промышленных условиях для управления газовыделением из горного массива СВЧ генератор необходимо опускать в скважину для обработки массива через ее стенки. При облучении породы от поверхности скважины вглубь массива распространяются электромагнитные волны, которые прогревают больший объем массива, чем требуется для эффективного воздействия. Их проникновение зависит от тангенса угла потерь – характеристики породы, определяющей ее поглощающую способность. Увеличение тангенса потерь приводит к уменьшению глубины проникновения электромагнитных волн и, соответственно, к уменьшению толщины нагреваемого слоя.

Проведенные лабораторные исследования показали, что существует возможность создания таких условий, при которых энергия воздействия не рассеивается по массиву, а концентрируется в ограниченном объеме пород, что необходимо для их структурной перестройки. Это происходит в результате преобразования электромагнитной энергии в тепловую и создания в породе растягивающих разрушающих напряжений.

Объем обрабатываемой породы за пределами скважины пропорционален длине волны излучения, что позволяет управлять состоянием горного массива в нужном направлении. Создаются условия для существования заданных типов колебаний, изменения расположения высокотемпературных внутренних областей тепла, смещения их в породе в процессе ее разрушения. Подобным же образом СВЧ воздействие осуществляется и в натуральных условиях.

Здесь на больших уровнях мощности при обработке песчаников тепловая энергия в основном затрачивается не столько на трещинообразование, сколько на перекрытие трещинных каналов при расплаве породы, что, к тому же, приводит к дополнительному увеличению времени воздействия, вплоть до стадии выхода расплава на поверхность. Эффективность СВЧ способа зависит от типа горной породы и скорости передачи энергии в нее. По этим признакам он больше подходит для алевролитов и аргиллитов, когда горная порода разрушается в основном за счет напряжений, создаваемых давлением испаряющейся влаги, продуктов диссоциации, а также теплового расширения источника. Уве-

личению в объеме жидкой или газообразной фазы сопутствуют динамические эффекты – в породе происходит образование трещин и выход их на свободную поверхность.

Процесс воздействия электромагнитных волн СВЧ диапазона на горные породы показал, что глубина локализации поглощающих зон в основном не превышает длины волны излучения и составляет для песчаников 20-30 мм, а для алевролитов – 50-60 мм. Медленный темп ввода энергии позволяет проплавливать образцы, не нарушая их сплошности, ускорение же приводит к раскалыванию образцов. Кроме того, в песчанике воздействие СВЧ приводит к переходу внутреннего источника тепла в жидкую фазу, движению ее к поверхности образца с образованием проплавленного канала, выходу расплава на поверхность образца и образованию кратера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булат А.Ф. Электроразрядное воздействие как способ структурных преобразований горных пород с целью их дегазации / А.Ф. Булат, С.Ю. Макеев, В.Я. Осенний, С.Ю. Андреев, В.И. Емельяненко, А.А. Баскевич // Геотехническая механика: Межведомственный сборник научных трудов / Ин-т геотехнической механики НАН Украины. – Днепропетровск, 2006. – Вып. 67. – С. 97-102.
2. <http://oil06.narod.ru/hightech.htm>
3. Москалев А.Н. Экспериментальное исследование температурных полей в горных породах-диэлектриках при СВЧ воздействии / А.Н. Москалев, О.В. Явтушенко, В.И. Лойк // Термомеханические методы разрушения горных пород: Тезисы III Всесоюз. научн.-техн. конф. – К.: Наукова думка, 1976. – С. 27-28.
4. Горелик С.С. Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ. Приложения / Горелик С.С., Растрогуев Л.Н., Скаков Ю.А. – М.: Металлургия, 1970. – 108 с.
5. Руководство по рентгеноструктурному исследованию материалов / Под ред. В.А. Франк-Каменецкого. – Л.: Недра, 1975. – 399 с.
6. Joint Committee on Powder diffraction standards / A Pennsylvania Non-profit Corporation 1601. Park lane. Swarthmore, Pa. 19081. Printed in Philadelphia, 1975.
7. Москалев А.Н. О возможности использования самофокусировки электромагнитных волн СВЧ - диапазона для разрушения горных пород-диэлектриков / А.Н. Москалев, О.В. Явтушенко, В.И. Лойк, В.К. Коробской, А.П. Образцов, Л.М. Блинов // ФТПРПИ. – 1978. – № 3. – С. 46-52.