

УДК 622. 24:537. 528

О. Н. Сизоненко

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО МЕТОДА ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ ОБЪЕКТОВ

*Наведено аналіз результатів електророзрядного методу дії на структуру пористих матеріалів і динаміку фільтрації в них вуглеводневих флюїдів на основі встановлених закономірностей зв'язку між показниками властивостей цих матеріалів та параметрами дії.*

*Ключові слова: високовольтний електричний розряд, амплітуда імпульсів тиску, пористість, проникність, поверхнево-активні речовини.*

### Введение

Данная работа представляет интерес для создания оптимальных методов нефтедобычи, при которой возникает необходимость воздействия на пористую структуру грунтов при наличии динамических процессов в глубинных осадочных горных породах, в которых происходит увеличение объема пористой среды, обусловленное сдвиговыми деформациями. Это явление известно в механике грунтов и горных пород как дилатансия.

Научные основы эволюции капиллярно-пористой структуры под действием внешних нагрузок, разработанные в работах [1–3], присущи как материалам порошкового происхождения, так и нефтеносным грунтам. К этому следует добавить, что в работах [1, 4] разработаны методы количественной оценки перемещения вязких жидкостей в капиллярно-пористых средах на основе закономерностей взаимодействия этих жидкостей с внутренней поверхностью капилляров. Эти работы открывают путь к анализу влияния растворов поверхностно-активных веществ (ПАВ) на особенности фильтрации жидкости в капиллярно-пористых средах [5].

Структура и внутренняя топология капиллярно-пористых материалов определяют характер переноса в них жидкостей, а интенсивность переноса и эффективность фильтрации, существенно зависят от различных отложений.

Структура и топология материалов естественного происхождения (грунты и нефтенесущие пласты осадочных горных пород) подвержены действию напряжений, возникающих в ходе их эксплуатации. Речь идет о напряжениях двух типов. Первые порождаются газом, содержащимся в углеводородных флюидах, а напряжения второго типа обусловлены гравитационным фактором и весьма существенны для пластов глубинного залегания. Совместное действие двух различных указанных полей может приводить к необратимым деформациям в капиллярно-пористых структурах естественного происхождения. Именно последний из указанных факторов и приводит к изменениям внутренней топологии, что совместно с отложениями на стенках капилляров твердых органико-минеральных композиций и приводит к резкому снижению интенсивности фильтрации, а в некоторых случаях — к прекращению переноса жидкости в капилляре.

Все вышесказанное определяет важность специального анализа процессов деформации капиллярно-пористых тел естественного происхождения и

необходимости их детального изучения как на стадии самой фильтрации, так и в условиях интенсивных воздействий на эти материалы. Моделирование этих воздействий проводилось высоковольтным импульсным разрядом.

### Методы исследований

Экспериментальные исследования влияния электроразрядного воздействия на динамику фильтрации углеводородных флюидов в пористых материалах естественного происхождения (керна песчаников и карбонатов) и их структуру выполнялись на оригинальном стенде высокого давления [6]. Стенд позволял создавать различные сочетания горного, внутривыводового и гидростатического давлений, фильтровать жидкость при постоянном расходе через пористый материал и фиксировать перепад давления на керне измерительным преобразователем разности давлений "Сапфир -22ДД". Корректность полученных результатов обеспечивается статистической обработкой результатов измерений и комплексом таких методов, как физико-химический анализ, определение механических свойств, оптическая микроскопия, регистрация быстропротекающих электрических и гидродинамических процессов.

### Обсуждение результатов

Перемещение примесей в гетерогенной среде происходит в тесной связи с чисто механическими трансформациями пористой среды, являющейся твердофазной частью всей гетерогенной структуры. Для анализа динамики этого процесса в определенной степени подходит математическая модель, описывающая процесс упругопластического деформирования и разрушения пористой, насыщенной жидкостью, среды.

Обычно в математической модели, описывающей процесс упругопластического деформирования вышеуказанной среды под действием гидродинамической волны, образовавшейся в результате электрического разряда, рассматриваются две подсистемы уравнений [9]:

1) уравнения, учитывающие законы сохранения массы, импульса и энергии в пористой матрице и в заполняющей поры жидкости, взаимодействие твердой и флюидной сред, связь между деформациями и напряжениями, пластическое течение, геометрические соотношения между скоростями деформаций и перемещениями, изменение пористости, уравнения состояния твердой и жидкой фаз, краевые условия [7, 8];

2) уравнения, учитывающие процессы переноса отложений с внутренних поверхностей твердой матрицы, баланс массы жидкости с ПАВ и баланс массы матрицы [10].

Рассматривалась система соосных цилиндрических слоёв, образованных жесткой перфорированной трубой, цементным кольцом, перфорированной и неперфорированной частями пористого материала.

Давление на стенку жесткой трубы  $P_m = 35$  МПа, которое создает электрический разряд в водном электролите с удельной электропроводностью  $0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$  (параметры существующих устройств типа "Скиф", запасаемая энергия — 1 кДж), при малых величинах гидростатического (до 5 МПа) и горного (до 10 МПа) давлений способствует образованию радиальных и цилиндрических трещин в пористой среде на расстоянии примерно 0,4 м. В результате этого может существенно повышаться проницаемость матрицы пористой среды.

Увеличение горного (более 10 МПа) и гидростатического (более 5 МПа) давлений препятствует образованию трещин отрыва. Разрушение матрицы пористой среды в результате сжатия наблюдается вблизи жесткой трубы в виде трещин сдви-

га. При относительно малых значениях давления на стенку жесткой трубы  $P^m$  (до 35 МПа) наблюдается упругий режим деформирования матрицы пористой среды.

Расчеты показывают, что наибольшая глубина проникания раствора ПАВ в пористую среду под действием одиночного разряда существующих электроразрядных устройств не превышает 16 мм. Граница контакта раствора ПАВ с нефтью совершает затухающие колебания с основной частотой (200...500 Гц) при двукратном уменьшении амплитуды за период колебаний.

Процесс растворения отложений веществ, загрязняющих поры, возможен в результате контакта с ними раствора ПАВ. Такой контакт происходит в результате вытеснения раствором ПАВ нефти вглубь пористой среды. Начальная стадия импульсного нагружения пористой среды характеризуется приблизительно линейной зависимостью между количеством последовательно выполненных электрических разрядов и массой отложений, удаленных из пор (то есть увеличением пористости). Изменение (повышение) проницаемости горных пород зависит от изменения (повышения) пористости в степени  $\cong 10$ . Следовательно, изменение проницаемости пористой среды в пределах насыщения её раствором ПАВ пропорционально количеству последовательно выполненных электрических разрядов, взятому в десятой степени.

Таким образом, несмотря на относительно малое количество отложений, удаляемых из пор за один разряд ( $\cong 10^{-5}\%$  (мас.) асфальто-, смоло-, парафиновых отложений (АСПО) при времени контакта ПАВ с отложениями  $\cong 3$  мс), последовательность разрядов может привести к существенному изменению проницаемости пористой среды.

Следовательно, необходимо добиваться увеличения амплитудных значений давления, способствующих изменению проницаемости за счет создания и развития трещин и интенсифицировать фильтрационные процессы растворов ПАВ в пористой среде, которые будут способствовать растворению и выносу загрязняющих веществ из пор [9].

Традиционное решение этой проблемы — увеличение запасаемой энергии в существующих установках более  $W = 1$  кДж, но оно сопряжено с рядом технических сложностей, связанных, в частности, с ограничением массогабаритных параметров установок. Другой путь — определение условий, которые будут способствовать эффективному преобразованию электрической энергии в условиях высоких гидростатических давлений.

Необходимо отметить, что при высоких давлениях (до 50 МПа) в условиях, характерных для пластов пористых материалов глубинного залегания, сложно реализовать узкий диапазон удельной электропроводности водного электролита ( $\sigma$ , от 0,1 до 0,28 Ом $^{-1}$ м $^{-1}$ ), позволяющей реализовать ее стабильный пробой, что связано с увеличением удельной электропроводности за счет загрязнения жидкости. В то же время минерализованная вода оказывает отрицательное действие на фильтрационные характеристики пористой среды, насыщенной углеводородными флюидами, проявляющееся в снижении фазовой проницаемости для нефти. Поэтому были выполнены исследования влияния состава рабочей среды при высоком гидростатическом давлении на стадию формирования и развития электрического разряда (ЭР), в которых использованы два базовых типа сред — водные электролиты и водонефтяные эмульсии (ВНЭ), в которые вводили добавки ПАВ.

Из большого количества синтетических ПАВ, предназначенных для сорбции и ориентации на различных поверхностях раздела, а также для изменения фазовых и энергетических взаимодействий на этих границах, были выбраны представители смешанного типа ПАВ — анионные и неионогенные, представителями которых являются многофункциональные композиции ПАВ — НМК-21.

Исследования, проведенные на экспериментальном стенде высокого давления, позволили установить, что тип ПАВ и их концентрация в водных электролитах не оказывают существенного влияния на характер зависимости времени задержки пробоя и на напряжение начала активной стадии разряда от гидростатического давления. Потери на предпробойной стадии увеличиваются с ростом гидростатического давления, повторяя характер аналогичной зависимости для водных электролитов.

Добавка НМК-21 в водонефтяные эмульсии не оказывает существенного влияния на стадию формирования разряда. Электрический разряд в ВНЭ и в ВНЭ с ПАВ отличается стабильностью времени задержки пробоя и слабо зависит от давления. В отличие от водных электролитов электрические характеристики при разряде как в ВНЭ, так и в ВНЭ с ПАВ, зависят от времени воздействия и выражаются в увеличении примерно в 2 раза времени задержки пробоя. Напряжение начала активной стадии разряда в ВНЭ с увеличением гидростатического давления несколько увеличивается, что вызвано стабилизацией состава эмульсии и ее постепенным насыщением продуктами разложения (преимущественно газами). При добавлении в эмульсию НМК-21 напряжение начала активной стадии разряда практически не зависит от гидростатического давления (до 40 МПа). В отличие от водных электролитов при разряде в ВНЭ с первых же импульсов начинается резкий рост давления, связанный с образованием в эмульсии значительного количества газов — продуктов разложения эмульсии. Условия, связанные с практически мгновенным термическим разложением ВНЭ, контактирующей с плазменным каналом разряда до газовой фазы, позволяют снизить потери на стадии формирования электрического разряда при высоком гидростатическом давлении.

Экспериментальные исследования импульсов давления при электрическом разряде в различных средах, выполненные с помощью волноводных датчиков давления, позволили установить (рис. 1), что при гидростатическом давлении  $P_2 \geq 5$  МПа наилучшими с точки зрения гидродинамики характеристика-

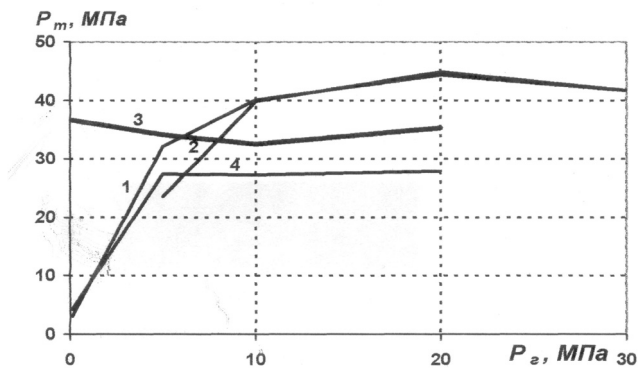


Рис. 1. Зависимость амплитуды импульсов давления от гидростатического давления  $P_2$  при электроразряде: 1 — ВНЭ+НМК-21 (при увеличении  $P_2$ ); 2 — ВНЭ+НМК-21 (при снижении  $P_2$ ); 3 — водный электролит; 4 — 0,3% водный раствор НМК-21

## II. Результати наукових досліджень

ми обладает разряд в водонефтяной эмульсии, что связано с низкими потерями энергии на стадии формирования электрического разряда [11].

Исследования воздействия высоковольтного электрического разряда в различных средах на структуру пористых материалов и динамику фильтрации в них углеводородных флюидов показали, что стабилизация проницаемости при фильтрации 0,3% водного раствора НМК-21 происходит примерно через 30 мин (у песчаников) и через 40 мин (у карбонатов). Фильтрация и воды, и ВНЭ через загрязненный АСПО керн не приводит к увеличению проницаемости — отмыв не происходит. Возможности увеличения проницаемости в результате высоковольтного электрического разряда в воде, а для карбонатов и в ВНЭ — совсем незначительно (~35%), выше, чем воздействие, которое оказывает раствор ПАВ. Установлено (рис. 2, а, б), что использование в качестве рабочей среды ВНЭ позволяет существенно (в 2 раза — для песчаников и 1,5

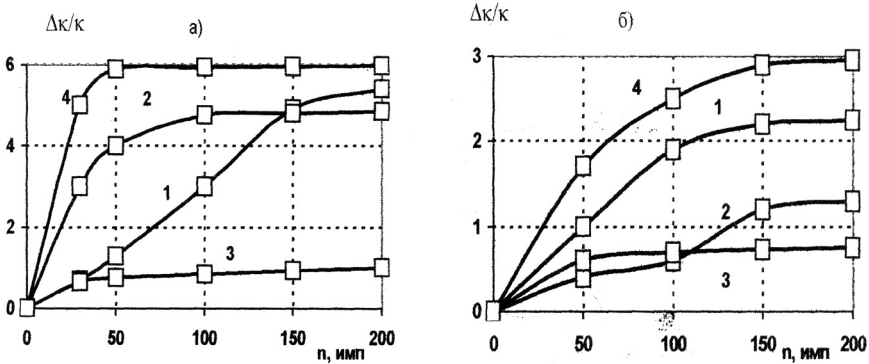


Рис. 2. Изменение проницаемости песчаников (а) и карбонатов (б) при электрическом разряде:

1 — 0,3%-ный водный раствор НМК-21; 2 — ВНЭ; 3 — вода; 4 — ВНЭ + 0,3% НМК-21

раза — для карбонатов) повысить эффективность электроразрядного воздействия по сравнению с водой. Комплексное воздействие электрического разряда и реагента (0,3% водного раствора НМК-21), используемого в качестве рабочей среды, приводит к синергетическому эффекту в увеличении проницаемости пород по жидкости, эффект в 2 раза превысил сумму эффектов от действий, которые производят самостоятельно ПАВ и электрический разряд. Эффект синергизма усиливается при добавке 0,3% НМК-21 в ВНЭ, абсолютные значения проницаемости и скорость ее роста в этом случае выше, чем в водных растворах НМК-21, ВНЭ и, тем более, в воде.

Наиболее существенные изменения пористости у песчаников (до 3 раз) и карбонатов (до 2,5 раз) наблюдаются при электрическом разряде в среде ВНЭ + 0,3% НМК-21. Известно, что в природных материалах, состоящих из неодинаковых по размерам пор, пористость зависит от распределения пор по размерам. Поэтому были выполнены исследования распределения пор по размерам до и после электроразрядного воздействия (рис. 3). Для этого весь массив получаемых данных распределялся по массивным группам, интервал значений в группе определялся произвольно, в соответствии с полученными значениями минимума и максимума.

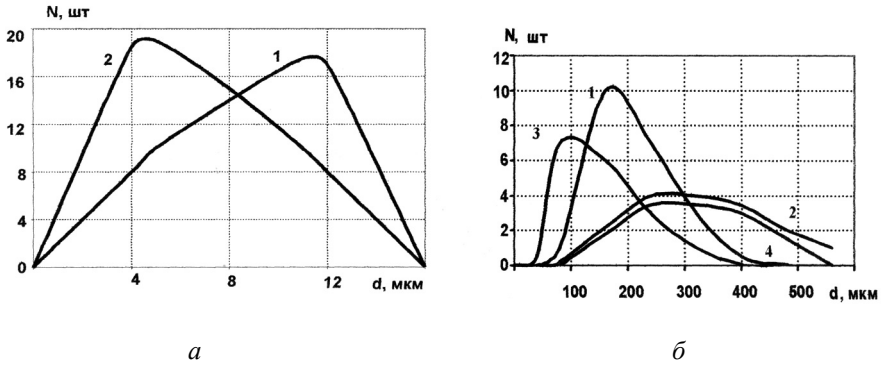


Рис. 3. Распределение пор в породах по размерам до ЭР: 1 — песчаники, 2 — карбонаты (а); после ЭР: 1 — песчаники (ВНЭ), 2 — песчаники (ВНЭ + 0,3% НМК-21); 3 — карбонаты (ВНЭ); 4 — карбонаты (ВНЭ + 0,3% НМК-21) (б)

Как видим, у песчаников до воздействия максимальный размер пор составляет 12 мкм (рис. 3, кривая 1), а в результате электроразрядного воздействия в среде ВНЭ с добавкой 0,3% НМК-21 размер пор увеличился от 80 до 560 мкм, причем большинство пор имеет размер 300 мкм (рис. 3, кривая 2). Аналогичная картина и для карбонатов, причем, если до воздействия максимальный размер пор у карбонатов был меньше в 2 раза, чем у песчаников, то после воздействия разброс значений размеров пор и их максимальные значения стали практически сравнимы (рис. 3, кривые 2 и 4).

Такое изменение пористости может свидетельствовать о том, что при импульсном нагружении пористой среды раствором ПАВ происходит перестройка ее структуры за счет искусственно созданной пористости (рис. 4). За счет роста сообщающейся пористости происходит рост проницаемости породы, которая значительно и необратимо увеличивается.

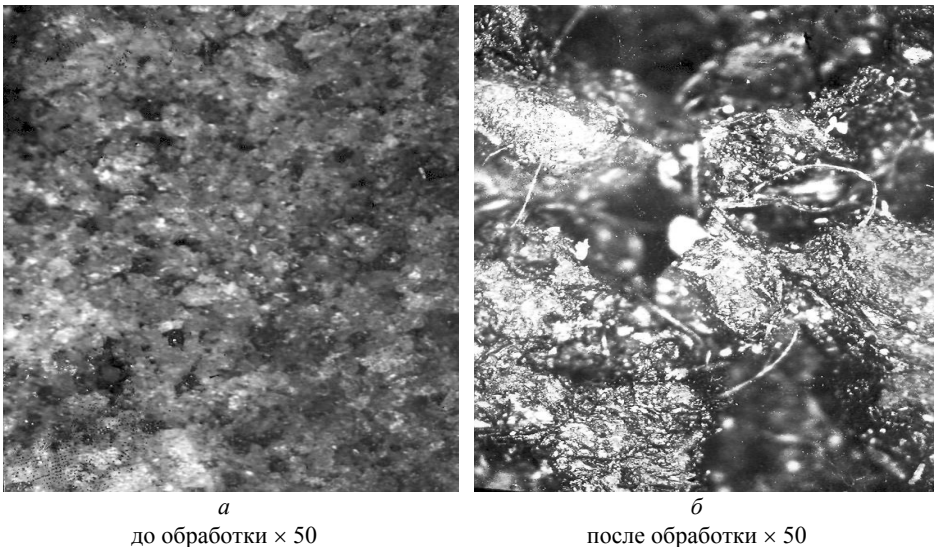


Рис. 4. Микроструктура песчаников (оптический микроскоп)

### Выводы

Решена задача влияния электроразрядного метода на изменения структуры пористых материалов, заполненных углеводородными флюидами, с целью улучшения их фильтрационных характеристик. Экспериментально определены условия, при которых высоковольтные электрические разряды приводят к изменению структуры пористых материалов, чему способствует активация растворов ПАВ, усиление их адсорбции в порах и микротрещинах, создание расклинивающего эффекта, дилатансионное разуплотнение породы. Установлены закономерности связи состава рабочей среды (водонефтяная эмульсия с добавкой ПАВ, в составе которого, присутствует пенообразователь) и параметров электроразрядного воздействия с временной зависимостью изменения фильтрационных характеристик — пористостью (у песчаников увеличивается в 3 раза, у карбонатов — в 2,5 раза), проницаемостью (у песчаников увеличивается в 6 раз, у карбонатов — в 3 раза) и структурой (размер пор существенно увеличивается). Эти результаты могут быть использованы для создания электроразрядной технологии интенсификации фильтрационных процессов в продуктивных нефтяных пластах в зависимости от типа породы, ее пористости и характера отложений.

*Приведен анализ результатов электроразрядного метода воздействия на структуру пористых материалов и динамику фильтрации углеводородных флюидов на основе установленных закономерностей связи между свойствами этих материалов с параметрами воздействия.*

**Ключевые слова:** высоковольтный электрический разряд, амплитуда импульсов давления, пористость, поверхностно-активные вещества.

*The analysis of results of the method of the change of porous materials structure and the dynamics of the hydrocarbon fluids filtration in them is given on the basis of the founded conformities to the law of communication between the indexes of properties of these materials with the parameters of the impact.*

**Keywords:** high voltage electric discharge, pressure pulse amplitude, porosity, penetration, the surface-active materials

1. Скороход В. В. Теория физических свойств пористых и композиционных материалов и принципы управления их микроструктурой в технологических процессах // Порошковая металлургия. – 1995. – № 1/2. – С. 53–71.
2. Штерн М. Б. Модель процессов деформирования сжимаемых материалов с учетом порообразования. II. Одноосное растяжение и сжатие пористых тел // Порошковая металлургия. – 1989. – № 6. – С. 34–38.
3. Скороход В. В. Реологические основы теории спекания. – К.: Наук. думка, 1972. – 151 с.
4. Косторнов А. Г. Материаловедение дисперсных и пористых металлов и сплавов: В 2 т. – К.: Наук. думка, 2003. – Т. 2. – 550 с.

5. *Сизоненко О. Н.* Синергетический эффект в изменении фильтрационных характеристик пористых насыщенных жидкостью сред при электроразрядном воздействии // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Вып. 42. – Днепропетровск: Ин-т геотехн. механики НАН Украины, 2003. – С. 173–186.
6. *Сизоненко О. Н.* Изменение фильтрационных свойств насыщенной пористой среды при электровзрывном воздействии / О. Н. Сизоненко, Д. Н. Ляпис, В. Н. Буряк и др. // Электронная обработка материалов. – 1992. – № 2. – С. 33–36.
7. *Николаевский В. Н.* Механика пористых и трещиноватых сред. – М.: Недра, 1984. – 232 с.
8. *Быков И. Г.* Нелинейные волны в пористых насыщенных средах / И. Г. Быков, В. Н. Николаевский // Докл. РАН. – 1993. – 328, № 1. – С. 35–38.
9. *Сизоненко О. Н.* Поведение примесей в слабопроводящей пористой среде с флюидами при импульсном давлении, возбуждаемом электрическим разрядом / О. Н. Сизоненко, А. И. Райченко, В. М. Косенков // Порошковая металлургия. – 2006. – № 11/12. – С. 3–12.
10. *Бармин А. А.* О фильтрации раствора в пористой среде с учетом адсорбции примеси на скелет / А. А. Бармин, Д. И. Дарагаш // Известия вузов. Механика жидкости и газа. – 1994. – № 4. – С. 97–110.
11. *Сизоненко О. Н.* Исследование влияния рабочей среды на амплитуду импульсов давления при высоковольтных импульсных разрядах / О. Н. Сизоненко, Э. И. Тафтай, О. В. Хвоцан // Электронная обработка материалов. – 2005. – № 2. – С. 45–49.