

О. Н. Сизоненко, О. В. Хвощан

К ВОПРОСУ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРИТОКА НЕФТИ В СВАЖИНЫ

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
просп. Октябрьский, 43А, г. Николаев, 54018, Украина*

Для увеличения нефтеотдачи пласта применяют искусственное воздействие на породы призабойной зоны. Проницаемость пород призабойной зоны улучшают искусственным увеличением числа и размера дренажных каналов, увеличением трещиноватости пород, а также удалением смол и парафина, осевших на стенках поровых каналов. Известно много способов воздействия на призабойную зону скважин (ПЗС), но как традиционным, так и новым методам присущи общие недостатки. С одной стороны, не достигается 100%-ного извлечения нефти, а с другой – их применение приводит к необратимым эффектам последствия, исключая дальнейшее доизвлечение оставшейся нефти другими, более перспективными методами, которые могут появиться в будущем. При этом возможно нарушение экологического равновесия, связанного с вводом в пласт воды, газов и химических реагентов.

По мере выработки нефтяных пластов и ужесточения экологических требований к разработке недр возрастает роль “бездефектных” (с точки зрения ущерба естественному состоянию пласта) методов воздействия. В настоящее время известен только один комплекс этих методов – воздействие физическими полями.

Также необходимо отметить, что поиски новых методов воздействия обусловлены необходимостью разработки метода одновременного воздействия как на физико-механические свойства коллектора, так и на реологические, поверхностные, капиллярные и другие характеристики пластовых жидкостей, а также возможностью регулировать процесс воздействия.

Одним из электрофизических методов воздействия на ПЗС является электроразрядный, который относится к импульсным методам, так как заключается в создании импульсов давления в пласте путем импульсного высоковольтного пробоя скважинной жидкости, представляющего собой электрический взрыв, сопровождающийся выделением большого количества энергии в малом объеме канала разряда [1]. Электроразрядная технология обработки ПЗС прошла опробование в различных геолого-технологических условиях Украины, России, Казахстана и Китая. Сущность технологии заключается в том, что в скважине, заполненной жидкостью, реализуя высоковольтный разряд, возбуждают циклические волны сжатия, пульсирующую парогазовую полость и акустические волны сжатия.

Реально наблюдаемые эффекты от электроразрядной обработки продуктивных пластов объясняются нами со следующих позиций.

Волны сжатия, которые возбуждаются при высоковольтном импульсном разряде в жидкости, заполняющей скважину, разрушают отложения в зоне перфорационных отверстий и циклически нагружают пористую насыщенную среду. Многократно отражаясь, они трансформируются в волны напряжения – растяжения, создают условия для развития сети трещин и микротрещин при соблюдении критериев разрушения, где окружные и радиальные напряжения превышают предел прочности среды на растяжение. Кроме того, электрический разряд является источником интенсивной деформации в породах, которая, в свою очередь является концентратором точечных и линейных дефектов.

Под действием импульса давления скважинная жидкость со скоростью около 150 м/с проникает в перфорационные отверстия и создает в породе расклинивающее действие, способствующее

образованию в прискважинной зоне тонких трещин, которые в силу необратимости деформации горных пород полностью не смыкаются [2].

В то же время высоковольтный электрический разряд в жидкости является источником импульсного возбуждения упругих волн в породе коллектора. Упругие волны оказывают влияние на фильтрацию жидкости, так как могут разрушить пространственную структуру жидкости, в том числе в пределах поверхностных слоев, примыкающих к стенкам поровых каналов, тем самым дезактивируя поровую поверхность и увеличивая скорость фильтрации [3]. Возникновение под действием внешней нагрузки сдвиговых напряжений при достижении некоторого предельного значения может привести к разрушению структуры поверхностного слоя, превращая его в ньютоновскую жидкость с вязкостью, равной ее вязкости в объеме. При этом характер течения жидкости в поровых каналах становится ближе к пуазелеву при одновременном увеличении эффективного сечения.

Необходимо учитывать и другое представление о взаимодействии любых возмущений, в частности, волн давления от электроразряда с насыщенной пористой средой. Известно, что любые возмущения по объему свободного флюида распространяются соответственно пьезопроводности пластовой системы. Одновременно с распространением возмущений по свободному объему на поверхности поглощенного комплекса диффузионной области формируется подобно электроосмотическим поднятиям и погружениям гравитационно-капиллярная волна, в n раз меньшая по длине [4]. Скорость распространения этих волн дозвуковая. Гравитационно-капиллярная волна поглощенного комплекса перекрывает часть живого сечения фильтрационного канала. Очевидно, влияние гравитационно-капиллярной волны будет в большей мере препятствовать течению жидкости в фильтрационных каналах меньшего диаметра в системах, где объем поглощенного комплекса и вязкость поглощенного флюида больше, то есть в низкопроницаемых нефтенасыщенных коллекторах.

Если рассматриваемые выше электроосмотические поднятия и погружения формируются в поре и межпоровом переходе канала переменного сечения и остаются на месте, то гравитационно-капиллярные волны движутся, но скорость их перемещения низкая. Как и всякие волны при своем перемещении они интерферируют. При наложении гравитационно-капиллярных волн формируется так называемая «стоячая волна» [4].

Гребни гравитационно-капиллярных волн будут либо срезаны волнами давления электроразряда, либо волны давления позволят преодолеть сопротивление, в том числе и сопротивление «стоячей волны», если она сформировалась, что обеспечит беспрепятственную фильтрацию флюида.

Таким образом, теоретические предпосылки объяснения физического механизма влияния электроразрядного воздействия на увеличение притока нефти в скважину показывают существенную зависимость эффективности процесса от физико-механических характеристик пород – коллекторов, реологических свойств жидкости, насыщающей коллектор, пластового и геостатического давлений.

Экспериментальной проверкой высказанной гипотезы установлено, что в цементированных монолитных коллекторах с малой начальной проницаемостью основным фактором улучшения фильтрационной способности является образование трещин за счет высоких сдвиговых напряжений при распространении волн сжатия [5]. Однако с увеличением проницаемости эффективность трещинообразования снижается, и превалирующую роль начинает играть изменение структуры нефти. Наиболее вероятно, что структура нефти будет разрушаться прежде всего по каналам наибольшей проницаемости, вдоль образующих которых будет создана более разветвленная, по сравнению с трещинами, и хорошо развитая фильтрационная поверхность.

Поскольку электроразрядная технология используется в остановленных на подземный или капитальный ремонт скважинах, обязательным условием является заполнение скважины жидкостью глушения до устья. Поэтому особое значение в электроразрядной технологии имеет жидкость глушения, так как эта жидкость является рабочей средой, в которой должен быть циклически реализован высоковольтный разряд. Скважина может быть заглушена минерализованной водой, к чему довольно часто прибегают нефтяники из-за простоты, однако проникновение в призабойную зону пласта больших объемов соленого раствора, твердых частиц и водных фильтратов, блокирующих ее, снижает фазовую проницаемость для нефти. В результате этого увеличиваются сроки освоения и ввода скважин на рабочий режим, снижаются дебиты в послеремонтный период эксплуатации, что обуславливает существенные недоборы в добыче нефти [6].

Нежелательно использовать минерализованную воду и в качестве рабочей среды при электроразряде. Нами установлено, что с увеличением электропроводности воды в диапазоне от $\sigma = 1,7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $9,3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (характерных для условий скважин) амплитуда импульсных давлений существенно снижается, что приводит к потере эффективности при обработке призабойной зоны [7].

В последнее время для глушения скважин в основном стали использовать жидкости на углеводородной основе, которые исключают негативное воздействие на продуктивный пласт [8]. Выполненные нами исследования формирования и развития высоковольтного разряда в водонефтяных эмульсиях при высоких гидростатических давлениях, характерных для нефтяных скважин, позволили установить, что использование в качестве жидкости глушения водонефтяной эмульсии обводненностью до 50% способствует повышению эффективности электроразрядного воздействия на ПЗС [9]. Эффективность воздействия повышается за счет увеличения амплитуды волны сжатия в результате снижения предпробивных энергозатрат по сравнению с водными электролитами любой (от водопроводной воды с $\sigma = 0,066 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ до $9,3 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, возможной в условиях скважин) электрической проводимости.

Поскольку увеличение притока нефти в скважину в основном зависит от фильтрационных характеристик пород-коллекторов в ПЗС, для подтверждения высказанных нами гипотез о физическом механизме электроразрядного воздействия нами проведены исследования зависимости проницаемости и пористости пород-коллекторов от амплитуды волн сжатия и времени воздействия в водонефтяной эмульсии различных гидростатических давлениях.

Работа выполнялась на экспериментальном стенде, моделирующем условия в скважинах, позволяя реализовывать различные сочетания геостатического, пластового и гидростатического давлений.

Энергетическая часть стенда включает в себя пульт управления и генератор импульсных токов, технологическая часть – камеру высокого давления со встроенным в ее корпус (перпендикулярно оси симметрии) кернодержателем, в котором создается всесторонний обжим керна. Внутри камеры введена электродная система, предназначенная для передачи энергии емкостного накопителя в рабочую среду и формирующая разряд. Стенд снабжен гидросистемой, включающей в себя установку УИПК, которая позволяет осуществлять фильтрацию жидкости через керн с постоянным расходом независимо от работы электроразрядного источника.

В качестве рабочей жидкости использовалась устойчивая водонефтяная эмульсия на основе нефти Павловского месторождения, обводненность которой составляла $O = 32\%$. Такая обводненность водонефтяной эмульсии является оптимальной с точки зрения механического действия разряда и стабильности пробы [9]. Плотность дисперсной фазы (воды) составляла $\rho_v = 1005 \text{ кг/м}^3$, удельная электрическая проводимость $\sigma = 1,7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Плотность дисперсионной среды (нефти) $\rho_n = 991 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость при температуре $t = 40^\circ\text{C}$ составляла $8,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Исследования проведены на кернах осадочных горных пород – песчаниках и карбонатах, вырезанных перпендикулярно оси из скважинных кернов (прямых круговых цилиндров). Перед проведением исследований все керны экстрагировались в экстракторе ЭК-100 по стандартной методике. Определялась их пористость и проницаемость, затем они насыщались нефтью, высушивались при $t = 70^\circ\text{C}$ до постоянного веса и определялись пористость и проницаемость “загрязненного” керна.

Для исследований отобраны керны песчаников и карбонатов с одинаковой начальной пористостью $m \cong 5\%$ и проницаемостью $k \cong 3 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, после загрязнения пористость снизилась до $\sim 2\%$, а проницаемость – до $\sim 0,2 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Соотношение геостатического (горного) $P_{гс}$ и пластового P_n (гидростатическое $P_r = P_n$) давлений при исследованиях составляют 2:1, что соответствует распространенным натурным условиям [10], эффективное (дифференциальное) давление ($P_{гс} - P_n$) составляло $P_{эф} = 20 \text{ МПа}$, давление бокового распора (осевой прижим) устанавливали $0,75P_{гс}$.

Гидростатическое давление в камере (P_r) изменялось от 10 до 30 МПа. Фильтрация жидкости осуществлялась через керн в камеру до стабилизации потока, о чем свидетельствовал установившийся перепад давления на керне, а затем на электроды подавалось напряжение и производилась электроразрядная обработка керна с частотой посылки импульсов $f = 0,2 \text{ Гц}$. По преобразователю измерительному разности давлений на керне фиксировался момент, когда перепад давления изменялся, и обработка продолжалась до момента стабилизации перепада давления.

Исходные параметры разрядного контура подбирались так, чтобы варьировать амплитуду импульса (избыточное давление на керн) в диапазоне $\Delta P_m = (14,0 - 28,0) \text{ МПа}$. Такой диапазон параметров обоснован тем, что нижний уровень амплитуды импульса можно создать реально существующим устройством типа “Скиф” [11], а верхний диапазон моделирует возможности устройств будущего поколения.

Как следует из представленной зависимости (рис.1) динамики изменения проницаемости $\kappa_{п}/\kappa$ (κ – проницаемость загрязненного зерна; $\kappa_{п}$ – проницаемость зерна после электроразрядной обработки) при избыточном давлении на зерно $\Delta P_m = 16$ МПа ($P_r = 20$ МПа), проницаемость песчаников изменяется примерно в два раза выше, чем у карбонатов. Увеличение гидростатического давления с $P_r = 10$ до 30 МПа снижает эффект увеличения проницаемости песчаников на ~ 25%, карбонатов – на ~ 30%, подтверждая нашу гипотезу о преобладающем действии волн сжатия, создающих и развивающих радиальные и цилиндрические трещины, в изменении фильтрационных характеристик. Так, если амплитуда волн сжатия с увеличением гидростатического давления снижается, то снижается и эффективность воздействия.

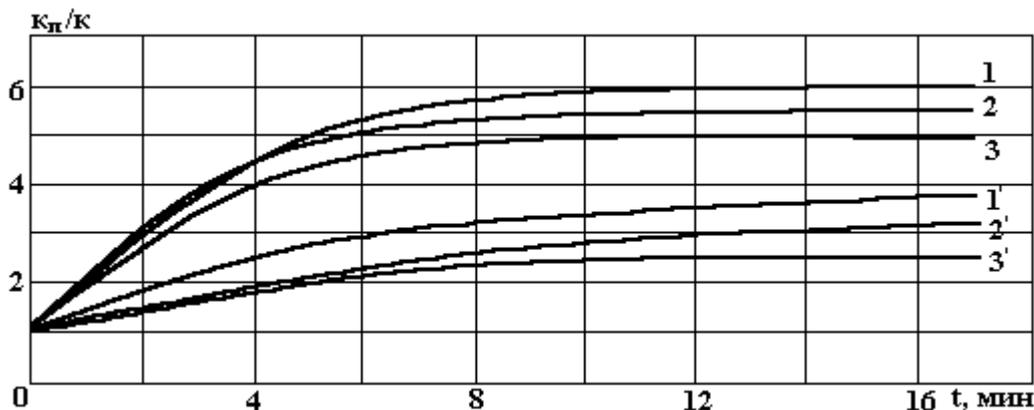


Рис. 1. Динамика изменения проницаемости песчаников (1–3) и карбонатов (1'–3').
 P_r : 10 МПа, $\Delta P_m = 18$ МПа (1, 1'), 20 МПа, $\Delta P_m = 16$ МПа (2, 2'), 30 МПа, $\Delta P_m = 14$ МПа (3, 3')

Величина амплитуды импульса сжатия в водонефтяной эмульсии влияет на изменение проницаемости зерен значительно больше (рис. 2), чем в среде водных электролитов с $\sigma = 0,066 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ (водопродовная вода). Если увеличение в два раза амплитуды импульсного давления приводит к росту проницаемости песчаников и ~ в два раза карбонатов, то в среде водонефтяной эмульсии ~ в три раза. Изменение проницаемости песчаников выше, чем карбонатов, на ~ 25% в любой среде.

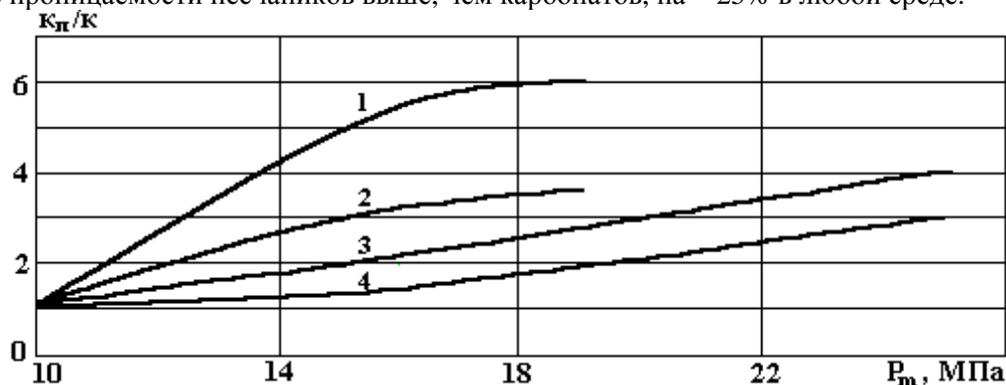


Рис. 2. Зависимость изменения проницаемости от избыточного давления на зерно при $P_r = 20$ МПа. 1 – песчаники в среде ВНЭ; 2 – карбонаты в среде ВНЭ; 3 – песчаники в водопроводной воде с $\sigma = 0,066 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$; 4 – карбонаты в водопроводной воде с $\sigma = 0,066 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$

Применение в качестве рабочей среды водонефтяной эмульсии позволяет меньшей амплитудой импульса сжатия (избыточное давление $\Delta P_m = 16$ МПа) произвести большее (на ~ 20%) изменение проницаемости и для песчаников, и для карбонатов (рис.3) по сравнению с водой (при $\Delta P_m = 25$ МПа).

На наш взгляд, более существенные изменения в улучшении фильтрационных характеристик песчаников и карбонатов при использовании в качестве рабочей среды водонефтяной эмульсии по сравнению с водным электролитом обусловлено не только лучшим механическим действием разряда, но и воздействием самого разряда на углеводородную среду.

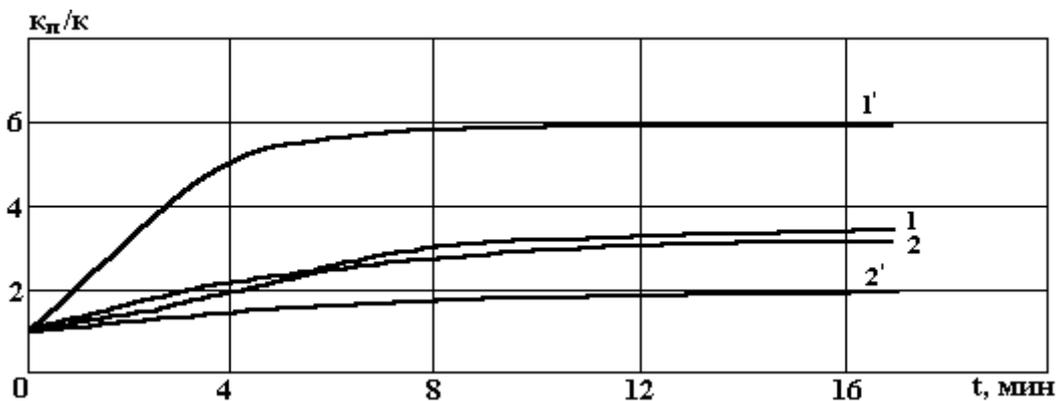


Рис. 3. Динамика изменения проницаемости песчаников (1, 2) и карбонатов (1', 2') при $P_g = 20$ МПа. 1, 1' – ВНЭ; 2, 2' – вода

При высоковольтном пробое водонефтяной эмульсии отмечается активное газовыделение за счет разложения нефтяной фазы [12]. Известно [13], что дегазация скважинной жидкости наряду с кавитацией влияет на фазовую и абсолютную проницаемость пласта, ускоряет фазовые переходы, влияет на диффузию и тому подобное.

В работах [13, 14] доказано, что при давлениях выше давления насыщения в газожидкостных системах наличие газа приводит к аномальному увеличению расходной характеристики пористой среды, а при вытеснении углеводородной жидкости они обладают лучшей по сравнению с обычной водой вытесняющей способностью.

Поэтому считаем, что эти вопросы, связанные как с разложением углеводородной среды рядом, так и с механизмом воздействия (долей вклада от дегазации жидкости) при использовании в качестве рабочей среды в скважине при электроразрядной обработке призабойной зоны водонефтяной эмульсии, требуют тщательного изучения.

Зависимость изменения пористости песчаников и карбонатов, представленная на рис. 4, показывает, что пористость увеличивается почти в два раза. При этом увеличение гидростатического давления с $P_r = 10$ МПа до 30 МПа приводит к снижению эффекта увеличения пористости у песчаников на ~ 30%, карбонатов – на ~ 20% аналогично изменению проницаемости (см. рис. 1).

Результаты экспериментальных исследований позволяют прогнозировать возможность управления при электроразрядном воздействии на ПЗС изменением фильтрационных характеристик пород – коллекторов в зависимости от их начальных характеристик и свойств жидкости глушения.

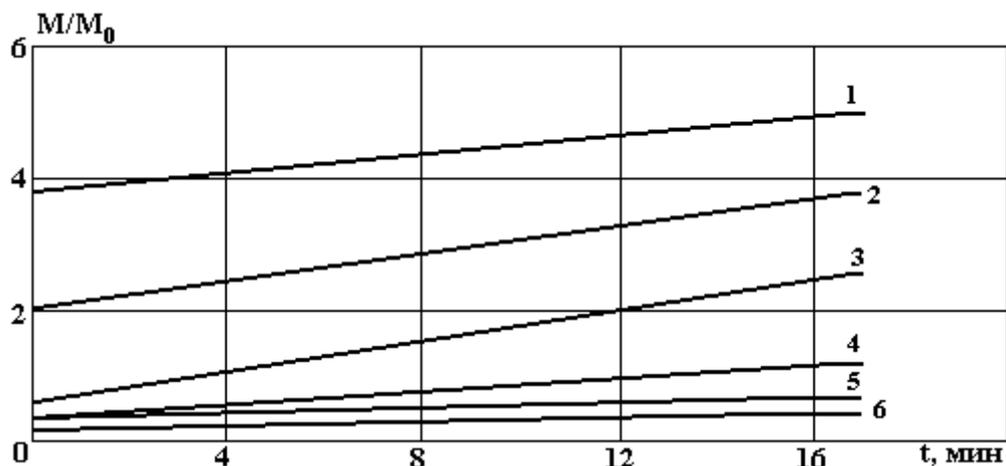


Рис. 4. Динамика изменения пористости кернов при различных гидростатических давлениях. 1 – 3 – песчаники; 4–6 – карбонаты. P_g , МПа: 30 (1, 6), 20 (2; 4), 10 (3, 5)

Таким образом, на основании теоретических предпосылок и экспериментальной проверки высказанных гипотез можно сделать вывод о принципиальной возможности влияния электроразрядного воздействия одновременно на физико-механические свойства коллектора и на основные параметры жидкостей, заполняющих поры нефтяного коллектора, а также о возможности регулирования процесса воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Максутов Р.А., Сизоненко О.Н., Малюшевский П.П. и др.* Использование электровзрывного воздействия на призабойную зону скважины // Нефтяное хозяйство. 1985. № 1. С. 34 – 35.
2. *Сизоненко О.Н., Швец И.С.* Особенности электроразрядной технологии интенсификации фильтрационных процессов в нефтяных скважинах // Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей. Санкт-Петербург, 1998. С. 137 – 139.
3. *Симкин Э.М., Лопухов Г.П.* Виброволновые и вибросейсмические методы воздействия на нефтяные пласты (обзор). М., 1989.
4. *Секерж-Зенькович Я.И.* К теории установившихся капиллярно-гравитационных волн конечной амплитуды // ДАН СССР. 1956. Т. 109. № 5. С. 913 – 915.
5. *Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н.* Исследование влияния профиля волны сжатия электроразряда на изменение пористости и проницаемости осадочных пород // Физика и техника высоких давлений. 1997. № 1. С.107 – 111.
6. *Ахмадиев Г.М., Орлов Г.А., Герман Б.А.* Влияние задавочных жидкостей на освоение и работу скважин в послеремонтный период // Нефтепромысловое дело Н.Т.С. 1981. № 9. С. 39 – 42.
7. *Сизоненко О.Н., Ляпис Д.Н., Буряк В.Н., Банько В.Н.* О возможностях электрического пробоя жидкости в прискважинной зоне // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах. Киев, 1991. С. 22 – 24.
8. *Орлов Г.А., Мусабилов М.Х., Сулейманов Я.И.* Технология глушения скважин с использованием обратной эмульсии и минерализованной воды // Нефтяное хозяйство. 1992. № 8. С. 43 – 44.
9. *Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н.* Влияние обводненности водонефтяной эмульсии на эффективность электрического разряда // Нефтяное хозяйство. 1996. № 4. С. 51 – 52.
10. *Григорян Г.Г.* Вскрытие нефтегазовых пластов стреляющими перфораторами. М., 1982.
11. *Сизоненко О.Н., Швец И.С., Кучернюк А.В.* Применение электроразрядного воздействия для обработки добывающих и нагнетательных скважин // Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 133 – 135.
12. *Печуро Н.С., Старостин В.К.* Совместное разложение легких и тяжелых углеводородов в высоковольтных электрических разрядах // Химические реакции органических продуктов в электрических разрядах. М., 1966. С. 93 – 101.
13. *Вахитов Г.Г., Симкин Э.М.* Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. М., 1973.

Поступила 23.12.02

Summary

The process management principles are considered and the analysis of possibilities of oil inflow into hole-bottom zone under high-voltage electric discharge in liquid is carried out. The hypothesis about the mechanism of the electric discharge influence on the well filtration processes intensification is formulated. The principled possibility to influence on physical and mechanical collector properties, basic liquid filling parameters and to regulate the influence process is showed.
