DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

УДК 550.832

ВНЕДРЕНИЕ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – НАДЕЖНЫЙ ПУТЬ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ ЗАПАСОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

А.А.МОЛЧАНОВ[1], П.Г.АГЕЕВ[2]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Компания «NOVAS Energy Services», Москва, Россия*

Перспективы дальнейшего увеличения добычи нефти обусловили необходимость внедрения новых передовых технологий на всех стадиях геологоразведочного процесса, бурения скважин, добычи и переработки углеводородов. На эксплуатируемых месторождениях, находящихся на поздней и завершающей стадиях разработки, в районах с развитой инфраструктурой задача повышения нефтеотдачи пластов особенно актуальна. Увеличение суммарного отбора нефти на месторождениях всего на несколько процентов позволяет получить дополнительно миллионы тонн нефти и газового конденсата.

Нефтяная залежь является многофакторной динамической диссипативной системой и подчиняется всем свойствам нелинейных самоорганизующихся систем. Для упорядочивания физико-химических процессов в пласте в режиме параметрического резонанса достаточно периодическое воздействие на пласт широкополосными импульсами давления независимого нелинейного источника. Таким независимым скважинным источником является плазменно-импульсный генератор с энергией около одного килоджоуля и частотным спектром от нескольких герц до нескольких килогерц с периодом следования упругих колебаний 1-2 раза в минуту.

Авторами технологии предложено применять подводный электрический взрыв проводников, в котором процесс образования проводящего канала представляет собой последовательную цепь фазовых преобразований металла под воздействием импульсного тока и затем пробой гидросреды по продуктам взрыва. Типичным процессом инициирования разряда является пробой межэлектродного промежутка в жидкости под действием электрического напряжения, возникающего на электродах при подключении к ним заряженного конденсатора через инициирующий взрыв проводник.

Применение плазменно-импульсного воздействия на продуктивный пласт аппаратурой обеспечивает повышение дебита эксплуатационных нефтегазовых и приемистости нагнетательных скважин в 2-6 раз и улучшение соотношения «нефть – вода» добываемого флюида.

Ключевые слова: нефтяная залежь, остаточные запасы, низкопоровые и слабопроницаемые коллекторы, плазменно-импульсное воздействие, обводненность продукции

***Как цитировать эту статью*:** Молчанов А.А. Внедрение новых технологий – надежный путь извлечения остаточных запасов месторождений углеводородов / А.А.Молчанов, П.Г.Агеев // Записки Горного института. 2017. Т. 227. С. 530-539. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

Введение. Современные методы разработки нефтяных месторождений системой пробуренных скважин с применением различных методов интенсификации притоков углеводородов при всей их огромной экономической эффективности и быстрой окупаемости капиталовложений обладают существенным недостатком, заключающимся в том, что степень выработки пласта даже при самых благоприятных условиях не превышает 50 % геологических запасов, а из месторождений с трудноизвлекаемыми запасами (низкопоровые и слабопроницаемые коллекторы, содержащие высоковязкие нефти, сильно обводненные залежи и др.) колеблется от 2 до 10 %.

Пути решения проблемы. Анализ физико-химических процессов, происходящих в пласте при разработке залежи, начиная от разбуривания месторождений скважинами и вскрытия продуктивных пластов, применения методов поддержания пластового давления, использования всевозможных реагентов для повышения подвижности углеводородов в пласте, ограничения прорывов воды и других технологий, препятствующих образованию в пласте и прискважинной зоне скважин нерастворимых солей, парафиновых отложений, уменьшающих подвижность нефтей и снижающих проницаемость коллекторов, показывает, что процессами в пласте можно успешно управлять. Это позволяет оптимизировать процесс разработки залежей, повышать коэффициент извлечения углеводородов [2, 5, 9, 12, 15-19, 28, 29, 31, 32].

Каковы же причины падения добычи углеводородов?

Первая – это истощение энергии пласта. Применяемые методы закачки воды, газа и других носителей, как правило, повышают интенсивность отбора пластового флюида, но из-за различий подвижности нефти, газа, воды по пласту, а также за счет анизотропии параметров пласта скорость продвижения углеводородов к добывающим скважинам неодинакова. Это приводит к образованию промытых зон и участков повышенной остаточной нефтенасыщенности (целиков нефти).

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

Вторая причина – уменьшение общей проницаемости продуктивных пластов и, соответственно, снижение дебитов скважин, а также рост обводненности продукции, поскольку в процессе выработки залежи ухудшаются характеристики прискважинных зон в добывающих и нагнетательных скважинах и пласта в целом (кольматация, отложение солей, парафинов и др.).

Особенно сложная задача – дополнительная добыча трудноизвлекаемых запасов углеводородов, в том числе из месторождений, находящихся на поздней и завершающей стадиях разработки.

В теории «синхронизации динамических систем» под динамическим материалом, к которому можно отнести любую продуктивную залежь, понимаются среды, физические параметры которых (плотность, вязкость, упругость, жесткость, электромагнитные и физические свойства) меняются как во времени, так и в пространстве. Это касается двух и более различных сред, которые, с одной стороны, взаимно проникают друг в друга, с другой, совершают относительно друг друга движения, в частности колебания (академик АН СССР И.И.Блехман).

Каждое месторождение углеводородов нужно рассматривать как сложную многофакторную нелинейную динамическую систему, в которой происходят постоянные изменения. Чаще всего в результате длительной эксплуатации залежи, постоянного техногенного вмешательства в процесс добычи нефти необходимо оперативно применять способы и технические средства для оптимального управления физико-химическими процессами в пласте [4, 17].

Существует корреляционная связь между фильтрационными потоками и волновыми акустическими и электромагнитными полями. Синхронизированное ритмическое гидродинамическое поле является акустической характеристикой нефтенасыщенных систем.

Ряд исследователей [15, 17, 22-24] объясняют эти явления нелинейностью взаимодействия физических сред. Становится совершенно очевидно, что в зависимости от степени генерации энергии в пласте измерения геофизических полей могут дать сведения об обратимых или необратимых процессах в залежи.

Исследование свойств геологического разреза с характерными для каждого пласта массой, плотностью, скоростью распространения упругих колебаний (продольные, поперечные и другие типы волн) позволяет сделать вывод, что затухание упругих колебаний разных частот в разрезе, сложенном породами, отличающимися пористостью, проницаемостью, содержанием глинистого материала, насыщенностью газом, нефтью или водой, должно быть различным [23, 24].

Каждый насыщенный пласт имеет свою собственную стационарную (доминантную) круговую частоту свободных резонансных колебаний, определить которую невозможно, поскольку она меняется во времени и пространстве, а в продуктивной залежи постоянно идет процесс неупорядоченных колебаний за счет закачиваемого в пласт рабочего агента для поддержания пластового давления и энергии, поступающей извне (приливы-отливы, природные и техногенные землетрясения и др.). Все это происходит в нелинейной диссипативной системе, вид и свойства колебаний которой определяются самой системой (*автоколебательный режим* – А.А.Андронов, 1929 г.).

Поскольку природа по существу нелинейна (академик РАН Р.Ф.Ганиев), круговая стационарная частота свободных резонансных колебаний зависит от начальных условий, а именно силы возмущения, и в этом случае появляется возвратная сила, отнесенная к единице массы, равная силе возмущения (академик АН СССР И.И.Блехман) [4].

Такие явления характерны для неравновесных упругих автоколебательных систем. При воздействии на газожидкостную среду турбулентные напряжения играют роль вибрационных сил (уравнение Рейнольдса). Возникшая пузырьковая среда приобретает иные свойства. В каждой сложной, комплексной неупорядоченной системе коэффициенты отражения, преломления и поглощения упругих колебаний меняют свои параметры и характеристики, а все акустические колебания в такой среде становятся низкочастотными (академики РАН А.С.Алексеев, В.Е.Накоряков) [20].

Если на такую среду воздействовать широкополосными периодическими импульсами одинаковой силы, разнесенными на одинаковые промежутки времени, то среда начнет формировать ударные импульсы за счет самомодуляции и в этом случае появится возвратная сила, отнесенная к единице массы и равная силе возмущения. Возникающая упругая ударная волна начинает растягивать и сжимать среду, распространяясь радиально по горизонтали от источника колебаний и вызывая эффект Ребиндера (П.А.Ребиндер – академик АН СССР).

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

Фундаментальные исследования, выполненные в Научном центре нелинейной волновой механики и технологии РАН, в области нелинейной волновой механики гидромеханических систем под руководством академика Р.В.Ганиева на основе новых, открытых в процессе создания волновой технологии, явлений и эффектов позволяют эффективно производить резонансную накачку энергии в обрабатываемые среды, тем самым многократно (до нескольких десятков раз) интенсифицировать технологические процессы [15, 22].

Теория самоорганизации показывает, что траектория в фазовом пространстве, описывающая эволюцию системы со сложно организованной внутренней структурой, очень чувствительна к малым возмущениям, обладая многими точками бифуркации (самоорганизация) открытых систем, их переходу от хаоса к порядку и наоборот [17].

Исследования многих российских и иностранных ученых, в том числе Б.П.Белоусова, А.М.Жаботинского, Э.Лоренца и др., доказали, что в неравновесных системах, т.е. в средах с подпиткой, могут распространяться автоволны, а неупорядоченные колебания при периодическом воздействии на них могут самоорганизовываться [15, 17]. В такой ситуации резко возрастает роль малых величин и эффектов, которые будучи задействованы вовремя, позволяют управлять процессами самоорганизации, направляя их желательным образом. Малые эффекты играют роль спускового крючка для скрытых резервов систем [17, 23, 24].

Таким образом, нефтяной пласт может рассматриваться в качестве открытой диссипативной нелинейной системы, готовой к самоорганизации и содержащей огромный источник непознанной и потому невостребованной энергии, которая в процессе эксплуатации неразрывно нелинейно связана с добывающими и нагнетательными скважинами.

Моделирование нелинейных процессов, происходящих в продуктивном пласте, позволяет нам рассматривать продуктивную залежь как совокупность колебательных систем (нелинейный осциллятор в неравновесной упругой среде), на которую можно воздействовать путем внешних вынужденных колебаний. Важнейшей особенностью неравновесной среды является то, что даже небольшая возмущающая сила может привести к непропорционально большому эффекту (триггерный эффект). Важно, чтобы воздействие было периодическим.

Исходя из изложенного, разработчики плазменно-импульсной технологии пришли к следующему выводу: чтобы возбудить сложную систему на резонансных частотах, необходимо иметь *идеальный*, *нелинейный широкополосный управляемый скважинный источник направленных периодических упругих колебаний* (*генератор накачки*). *Такой источник инициируемых периодических колебаний неизбежно приведет к самоорганизации системы*, *т.е. упорядочению колебаний в пласте*, *что проявится одной или несколькими* (*в случае многослойной системы*) *квазигармониками*, *а следовательно*, *возникновением резонансных явлений* [17].

Скважинный источник упругих колебаний для воздействия на призабойную зону пласта и пласт в целом должен, с одной стороны, обладать достаточной мощностью, чтобы разрушить закольматированное пространство, повысить подвижность скважинного флюида, с другой стороны, сохранить целостность цементного кольца.

Такими возможностями обладает разработанный нами высоковольтный плазменно-импульсный генератор [17, 25]. Применение *«взрывной»* калиброванной проволоки для инициирования электрического пробоя в междуэлектродном пространстве способствует образованию устойчивой холодной низкотемпературной плазмы независимо от электропроводности скважинного флюида и гидростатического давления окружающей среды. Плазма – это ионизированный газ с высокой температурой и давлением, который образуется за 50-55 мкс за счет мгновенного испарения специально подобранного калиброванного металлического проводника. Отличительной особенностью такой плазмы является квазинейтральность.

Процесс образования плазмы сопровождается упругим импульсом длительностью 50-55 мкс с частотным спектром от единиц герц до 10,0 кГц, давлением в импульсе более $2 \cdot 10^3$ МПа и температурой свыше 25000 °С.

Указанные характеристики: способность накапливать большое количество энергии и за короткий промежуток времени выделять ее с высокой скоростью и температурой, создавая колебания и волны со значительной амплитудой (теория нелинейности), – присущи нелинейным системам объектов [6, 11, 22, 30, 33].

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

Расширение плазменного канала и его последующее «схлопывание» по периодическому принципу оказывает на призабойную зону пласта и пласт в целом знакопеременные нагрузки. В результате многократного периодического повторения циклов репрессия-депрессия ударные гидравлические волны давления распространяются по скелету пласта и его пористой среде и изменяют емкостные и фильтрационные свойства пород. Под их влиянием происходит очистка интервалов перфорации от кольматирующих частиц породы и остатков бурового раствора, его фильтрата, а также выпавших в пористой среде осадков солей и асфальтосмолопарафиновых образований. Импульсы давления раскрывают природные трещины коллектора и способствуют образованию новых трещин [16-19, 25].

Многочисленные геофизические, гидродинамические исследования показали, что пористость коллектора при периодическом воздействии изменяется незначительно, а проницаемость резко увеличивается.

Для получения дополнительного притока флюида в добывающую скважину или повышения приемистости прискважинной зоны нагнетательной скважины необходимо инициировать серию упругих периодических импульсов по всему рабочему интервалу перфорации, давление которых превышало бы коэффициент закупорки, а скорость распространения этих импульсов способствовала бы увеличению коэффициента пьезопроводности [25].

Особенностью предлагаемой технологии скважинного плазменно-импульсного воздействия является влияние не только на призабойную зону, но и на пласт в целом благодаря глубокому проникновению сейсмоакустической волны в него и созданию в пласте резонансных процессов.

Необходимое количество периодических импульсов «накачки» зависит от горно-геологических, фильтрационно-емкостных и других особенностей залежи, свойств пластовых флюидов и рассчитывается по специальной методике. Инициируемые импульсы через равные промежутки времени с определенным давлением на начальном этапе создают ударную волну, которая в упругой среде вызывает упругие колебания во всей газожидкостной поровой системе.

Дальность действия плазменно-импульсного воздействия на пласт при определенных геологических условиях может составлять до 1800 м. Поэтому скважины, находящиеся на обрабатываемом пласте, зачастую воспринимают это воздействие. За счет очистки пор коллектора, образования новых трещин, лучшей отмываемости нефти повышается подвижность пластового флюида, снижается обводненность и увеличивается дебит добываемой продукции обрабатываемой и реагирующих скважин.

Очевидно, параметрическим резонансом пласта, синхронизацией динамической системы, в результате которой легкая фаза замещает тяжелую, можно объяснить уменьшение обводненности продукции после воздействия, поскольку возникают периодические колебания пластового флюида.

При движении капель жидкости из-за неоднородности капилляров, их различной кривизны возникает разность сил поверхностного натяжения – так называемое капиллярное сопротивление. Как показали исследования, упругие волны могут способствовать снижению капиллярного сопротивления. Воздействие упругой волны на каплю в среднем может быть охарактеризовано вибрационной силой, которая в случае действия волн определенных характеристик, зависящих от геометрических размеров капель и капилляра, а также от физических свойств жидкости капель и стенок капилляра, может быть направлена против вектора сил капиллярного сопротивления, что приводит к его снижению [13].

Рассматривая течение вязкой сжимаемой жидкости по капилляру, вдоль стенок которого распространяются бегущие волны изгиба, удалось установить, что при определенных размерах капилляров волны могут обеспечить значительное ускорение течения жидкости. Причем особенно значителен этот эффект для узких пор, диаметр которых порядка 1-10 мкм. Даже при амплитудах волн на поверхности пор, не превышающих долей процента от ее диаметра, эффект ускорения течения может достигать пяти и более порядков [13].

Чтобы достичь аналогичного эффекта путем повышения статического градиента давления вдоль поры потребовалось бы его увеличение более чем в 10^5 раз, что практически неосуществимо. Этот факт позволяет рассматривать волны как один из наиболее эффективных

DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530

механизмов ускорения течений в капиллярах и пористых средах. Понимание этого эффекта позволяет использовать его для ускорения течения жидкости в призабойных зонах нагнетательных и добывающих скважин, чтобы интенсифицировать приток жидкости в скважину или увеличивать приемистость и изменять профиль приемистости. Этот, открытый теоретически, эффект является одним из научных принципов, на которых базируется идея использования волн в нефтяной промышленности. Эксперименты и наша практика промышленного применения подтверждают исследования российских ученых. Предполагается, что отмеченные эффекты связаны с существованием «микрозародышей» – мельчайших газовых пузырьков или капель конденсата, кооперативное действие которых проявляется при приближении к давлению перехода [13].

Лабораторные и модельные исследования (А.В.Максютин, Санкт-Петербургский горный институт, 2008 г.) плазменно-импульсного воздействия на тяжелые и высоковязкие нефти и пористые среды с тяжелыми и высоковязкими нефтями месторождений Татарстана (Ромашкинское месторождение, карбонатный коллектор, плотность нефти 0,84 г/см^3, вязкость 40 мПа·с) и Республики Коми (Усинское месторождение, карбонатный коллектор, плотность нефти 0,87 г/см^3, вязкость 703 мПа·с) подтвердили перспективность применения технологии [14] и показали следующее:

1) снижение интенсивности проявления вязкости, тиксотропных вязкоупругих свойств высоковязких нефтей достигается за счет диспергирующего действия инициируемых упругих волн на основные структурообразующие компоненты нефти – асфальтены;

2) периодические плазменные импульсы оказывают гидрофобизирующее воздействие на пористую среду пород коллектора, что способствует снижению капиллярных давлений и улучшению фильтрационно-емкостных характеристик продуктивного пласта [13, 14];

3) новые перспективы открываются в повышении извлекаемых запасов тяжелых и высоковязких нефтей месторождений с трудноизвлекаемыми запасами при комплексном использовании плазменно-импульсной технологии с температурным и физико-химическим воздействием водных растворов щелочи и кислотных составов;

4) единовременная плазменно-импульсная обработка образцов и пластов приводит к перестройке структуры нефтей, которая сохраняется продолжительное время (95 суток и более, образцы усинской нефти сохраняли пониженную вязкость после плазменно-импульсного воздействия – ПИВ более двух лет) [14].

Заметный эффект наблюдается при применении ПИВ в нагнетательных скважинах с целью увеличения приемистости и выравнивания ее профиля. Сфокусированный упругий периодический импульс, направленный в пласт, очищает каналы в прискважинной зоне пласта, разрушает слой кольматанта с аномально избыточной поверхностной энергией, что позволяет улучшить в облучаемой части пласта или пропластках приемистость нагнетательной скважины. А поскольку глубина воздействия на пласт составляет сотни метров и более, эффект нагнетания воспринимают соседние добычные скважины. Кроме того, вводятся в эксплуатацию ранее пропущенные непромытые пропластки. Практика показала, что обработка этим методом нагнетательных скважин позволяет значительно увеличить охват объекта разработки заводнением, замедлить темпы падения добычи углеводородов [16].

Следует отметить, что для выравнивания профиля приемистости или для перераспределения закачиваемой жидкости по пропласткам не требуется проводить изоляционные, водоотводные мероприятия с применением различных поверхностно-активных веществ. Достигаемый эффект позволяет включить в работу ранее непромытые зоны, увеличить охват заводнением, тем самым повысить коэффициент извлечения нефти (КИН), и такая задача решается без каких-либо дополнительных капитальных затрат.

Мы достаточно успешно применяем плазменно-импульсную технологию в различных геолого-технических условиях, на месторождениях с терригенными и карбонатными коллекторами и тяжелыми нефтями в России (Урало-Поволжье, Тимано-Печора, Западная Сибирь) (см. таблицу) и за рубежом (КНР, Кувейт, Казахстан, Узбекистан, Чехия, США), что подтверждается геофизическими исследованиями до и после применения воздействия.

Примеры обработки продуктивных нефтяных пластов месторождений России технологией плазменно-импульсного воздействия

Месторождение	Номер скважины	Тип скважины	Тип коллектора	Плотность, г/см^3	Вязкость, мПа·с	Параметры работы скважины, т/сут		Прирост, %
						до обработки	после обработки	
Советское	631	Добывающая	Терригенный	0,772	1,6	11	16	45
Первомайское	856	"	"	0,753	0,9	27	41	52
Ардалинское	5	"	Карбонатный	0,845	1,52	45	62	38
Дюсушевское	7	"	"	0,845	1,52	2	11	450
Западно-Сихорейское	70	"	"	0,845	1,52	85	165	94
Ардалинское	8	"	"	0,845	1,52	25	32	28
Ошкотынское	44	"	"	0,845	1,52	22	30	36
Раевское	6	Нагнетательная	Терригенный	Пластовая вода	1,015	11	70	536
Западно-Ноябрьское	185	"	"	То же	1,015	28	75	167
Суторминское	8741	"	"	"	1,015	70	140	100
Суторминское	1475	"	"	"	1,015	50	94	88
Муравленковское	2087	"	"	"	1,015	275	700	154
Средне-Итурское	235	"	"	"	1,015	110	259	135
Романовское	1079	"	"	"	1,015	100	190	90
Ломовое	616	"	"	"	1,015	19	116	511
Северо-Вахское	1046	"	"	"	1,015	0	90	–

Работы, начатые в Санкт-Петербургском горном институте, НИИЭФА им. Д.В.Ефремова, ЗАО «РОСТ», ООО НПЦ «ГеоМИР», ООО «Георезонанс», успешно развиваются фирмой «NOVAS Energy Services», «НОВАС Ск» (резидент Государственного фонда Сколково). Массовое опытно-промышленное внедрение плазменно-импульсной технологии в РФ и за рубежом проводится группой компаний при поддержке инвесторов и фонда Сколково (генеральный директор – канд. экон. наук Н.П.Агеев, директор по стратегическому развитию «NOVAS Energy Services» – П.Г.Агеев, научный консультант по технологии ПИВ – профессор Санкт-Петербургского горного университета д-р техн. наук А.А.Молчанов) [1, 16-19, 25-27, 34]. Аппаратурой плазменно-импульсного воздействия успешно обработано более 400 нефтяных скважин с различными геолого-техническими условиями, результаты работ широко освещены в печати и приведены на сайте www.NOVAS-Energy.ru и «НОВАС Ск» (http://sk.ru/net/1110227/). Технология защищена патентами РФ и США.

Опыт применения аппаратуры плазменно-импульсного воздействия показывает, что даже в скважинах месторождений с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, коллекторами с пористостью 2-3 % и проницаемостью $(1,5\text{-}3)10^{-12}$ м^2 можно получить многомесячный эффект повышения дебита скважин и снижения содержания воды в добывающем флюиде. Эффект воздействия продолжается от 6 до 24 мес., иногда и более в зависимости от свойств коллектора и стадии разработки месторождения.

На основании фундаментальных научных исследований выдающихся ученых АН СССР и РАН академиков А.С.Алексеева, И.И.Блехмана, Р.Ф.Ганиева, А.Н.Дмитриевского, Я.Б.Зельдовича, Л.Д.Ландау, В.Е.Накорякова, А.К.Четверушкина и других авторами технологии скважинного плазменно-импульсного воздействия предложено применять в качестве мощных источников гидравлических импульсов подводный электрический взрыв проводников (ПЭВП), в котором процесс образования проводящего канала представляет собой последовательную цепь фазовых преобразований металла под воздействием импульсного тока и затем пробой гидросреды по продуктам взрыва [3, 6-8, 10, 21, 26, 27, 34]. Типичным процессом инициирования разряда является пробой межэлектродного промежутка в жидкости под действием электрического напряжения, возникающего между электродами при подключении к ним заряженного конденсатора через инициирующий проводник [25]. При образовании канала взрыва разрядный ток мгновенно достигает десятков и сотен килоампер, образуется низкотемпературная плазма с температурой на начальной стадии до $2,5\cdot10^4$ °С. При интенсивном выделении энергии скорость расширения канала сравнима со скоростью звука в жидкости и даже превосходит ее. В этих случаях волна

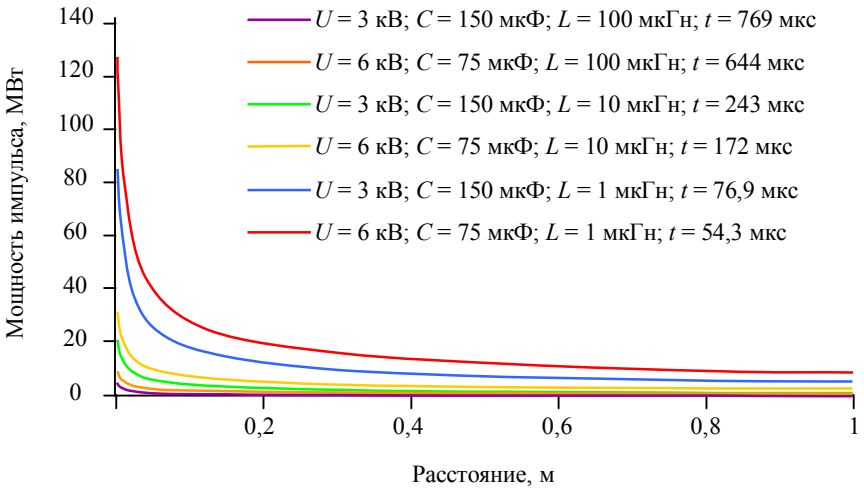
сжатия, распространяющаяся в жидкости, превращается в ударную волну в непосредственной близости от канала или же сразу излучается в виде ударной волны. В процессе разряда во время протекания тока температура плазмы меняется незначительно, спадая только после окончания разряда. Разогрев плазмы вызывает повышение давления в канале. Под действием повышенного давления канал расширяется. Давление в канале в процессе разряда проходит через максимум на начальной стадии, давление в канале, несмотря на увеличение его объема, возрастает и спадает к концу разряда. В максимуме давление достигает $2 \cdot 10^3$ МПа при умеренной плотности энергии в канале [10, 21, 27].

Плотность плазмы в процессе разряда меняется незначительно и поддерживается на уровне 10^{20} частиц на 1 см^3. Это происходит потому, что уменьшение плотности плазмы из-за расширения канала компенсируется поступлением новых частиц в результате испарения воды со стенок канала. Расширение канала продолжается после окончания выделения энергии, сначала под действием давления, повышенного по сравнению с гидростатическим давлением, а затем благодаря инерции растекающегося потока жидкости. На послеразрядной стадии канал превращается в газовый пузырь. Расширение пузыря происходит до тех пор, пока кинетическая энергия растекающегося потока не перейдет полностью в потенциальную энергию пузыря, давление в котором меньше гидростатического. Затем под действием гидростатического давления происходит обратное движение жидкости, потенциальная энергия снова переходит в кинетическую энергию сходящегося потока. При захлопывании полости давление газа в ней резко возрастает. Под действием этого давления жидкость отбрасывается назад и процесс повторяется в виде последующих затухающих пульсаций [10, 21, 27].

Энергия, выделяющаяся в канале разряда, расходуется, в основном, на работу, совершаемую каналом при расширении (около 50 %) и на нагрев вещества в канале разряда. Работа, совершаемая каналом, разделяется на энергию волн сжатия (до 20 %) и на энергию пульсации (до 30 %) [21, 27]. По данным [3], энергия ударной волны составляет 62,8 %, на термическое излучение расходуется 6,2 % и на образование газового пузыря 31 %. Как правило, теоретические расчеты возбуждаемых процессов крайне затруднительны и чаще всего дополняются физическими экспериментами [10, 11, 21, 27].

Вопрос об эффективности преобразования энергии при ПИВ возникает с необходимостью выбора оптимального режима разряда LC-цепи, при котором обеспечивается максимум механического действия [22]. Мерой такого воздействия могут служить параметры ударной волны. Большинство исследований показывает, что высокая эффективность наблюдается, когда разряд протекает в режиме, близком к критическому, когда вся запасенная в конденсаторах энергия выделяется в течение одной положительной полуволны тока разряда. Разряд, близкий к критическому ($\eta < 1$), обеспечивает наиболее быструю передачу энергии накопителя в канал разряда и наибольший акустический КПД. В согласованном режиме время нарастания мощности равно $0{,}8\sqrt{LC}$. Исходя из этого, период интенсивного выделения энергии не должен превышать 40 мкс, индуктивность зарядной цепи 3-4$\cdot 10^{-6}$ Гн, емкость силовых конденсаторов 80-120 мкФ. Максимальное давление в канале $P_a^m \cong 0{,}17(p_0 C U_0^2 / L l_{\text{р.п}})^{1/2}$ зависит от свойств проводника, скорости подвода энергии и гидродинамических характеристик продуктивного пласта (p_0 – гидростатическое давление в скважине; C – емкость конденсаторов; U_0 – напряжение заряда конденсаторов; L – индуктивность разрядного контура; $l_{\text{р.п}}$ – длина разрядного промежутка, м). При глубине скважины 3 км давление составит 325 МПа при C = 170 мкФ, U_0 = 6 кВ и L = 1 мкГн.

Напряжение и емкость являются главными факторами, определяющими длину (напряжение) и диаметр (емкость) искрового канала. При увеличении напряжения резко возрастает энергия импульса ($W = CU^2/2$) и крутизна фронта импульса тока. Увеличение индуктивности разрядного контура приводит к резкому возрастанию длительности импульса и изменению крутизны фронта. Поэтому ничтожное уменьшение индуктивности приводит к увеличению механического КПД разряда. Увеличение сопротивления разрядного контура снижает энергию импульса и уменьшает амплитуду тока, вызывает увеличение длительности импульса и резко влияет на крутизну фронта, делая его более пологим, что в конечном счете уменьшает КПД.



Зависимость мощности ударной волны от расстояния (от 0,01 до 1 м) при плазменно-импульсном воздействии аппаратурой при различной емкости конденсаторов, напряжениях и индуктивности разрядного контура

Длина инициирующего проводника $l_{\text{опт}} = 1{,}35 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt[4]{LC}$. Его диаметр

$$d_{\text{опт}} = \left(\frac{W_0}{\sqrt{LC} h^*} \right)^{1/4},$$

где $h^* = \rho_{\text{п}} \sigma_{\text{пр}} (\lambda_{\text{п}} + \gamma_{\text{п}})$; $\rho_{\text{п}}$ – сопротивление проводника; $\sigma_{\text{пр}}$ – плотность металла проводника; $\lambda_{\text{п}}$, $\gamma_{\text{п}}$ – затраты энергии при плавлении и испарении металла проводника.

Мощность излучения ударной волны (см. рисунок) определяется формулой [21]

$$P = \frac{2 \cdot 10^2}{\sqrt{r}} \left(\frac{C U_0^2}{L} \right)^{5/16} \omega^{7/16},$$

где r – положение фронта ударной волны относительно первоначального положения инициирующего проводника; ω – резонансная частота.

Известно, что акустические и электромагнитные поля (так называемый электроосмос) способствуют ускорению физических и химических процессов [5, 27, 34]. При плазменно-импульсном воздействии за счет электрического разряда в гидросфере образуются мощные импульсные упругие «ударные волны» (с энергией порядка $2 \cdot 10^8$-10^{10} МПа), которые увеличивают подвижность скважинного флюида в пласте в режиме резонансного состояния на «доминантных» частотах [3, 7, 8, 11, 23, 24].

Выводы

1. Нефтяная залежь является многофакторной динамической диссипативной системой и подчиняется всем свойствам нелинейных самоорганизующихся систем.

2. Для упорядочивания физико-химических процессов в пласте в режиме параметрического резонанса достаточно периодическое воздействие на пласт широкополосными импульсами давления независимого нелинейного источника.

3. Независимым скважинным источником является плазменно-импульсный генератор с энергией около одного килоджоуля и частотным спектром от нескольких герц до 10,0 кГц с периодом следования упругих колебаний 1-2 импульса в минуту.

4. Применение плазменно-импульсного воздействия на продуктивный пласт разработанной аппаратурой обеспечивает:

– повышение дебита эксплуатационных нефтегазовых и приемистости нагнетательных скважин в 2-6 раз и улучшение соотношения «нефть – вода» добываемого флюида;

– увеличение извлекаемых запасов нефти без значительных капитальных вложений при любой обводненности скважин (более 75 %), воздействие производится в целом на нефтяные пласты и ранее неохваченные воздействием зоны и пропластки, в результате чего увеличивается дебит скважин, находящихся на одном продуктивном пласте;

– увеличение приемистости нагнетательных скважин при снижении давления нагнетания и, как результат, возрастание дебита реагирующих скважин, снижение темпов падения дебита углеводородов, а следовательно, увеличение КИН;

– экологическую чистоту, простоту и безопасность в эксплуатации;

– минимальные затраты материальных средств, окупаемость затрат на комплекс работ по применению ПИВ не превышает 3 мес. в зависимости от режима эксплуатации;

– незначительные временные затраты на обработку скважины (8-10 ч), после чего она вновь вводится в эксплуатацию;

– гарантированное увеличение дебита по жидкости и нефти, длительность эффекта воздействия составляет от 6 до 24 мес. и более.

5. Еще большие перспективы открываются при использовании комплексной технологии обработки пластов месторождений с трудноизвлекаемыми запасами углеводородов, в том числе с высоковязкими нефтями, закачкой реагентов, а также при щелевой разгрузке рабочего интервала горизонтальных скважин с одновременным применением плазменно-импульсного воздействия без применения гидравлического разрыва пласта при добыче метана из угольных пластов в действующих шахтах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агеев П.Г.* Эффективность подтверждается // Нефтесервис. 2009. № 4 (8). С. 44-48.

2. *Богомольный Е.И.* Интенсификация добычи высоковязких парафинистых нефтей из карбонатных коллекторов месторождений Удмуртии. Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2003. 272 с.

3. *Бунтцен Р.* Применение взрывающихся проволочек при изучении мощности подводных взрывов // Электрический взрыв проводников: Пер. с англ. М.: Мир, 1965. С. 225-238.

4. Вибрации в технике. Справочник: В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И.Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.

5. Влияние физических полей на технологические процессы нефтедобычи / О.С.Герштанский, Н.М.Шерстнев, Д.А.Крылов, А.В.Уголева, М.И.Курбанбаев, Б.Д.Елеманов, М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2001. 236 с.

6. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990. 203 с.

7. *Зельдович Я.Б.* Теория ударных волн и введение в газодинамику. М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 187 с.

8. *Зельдович Я.Б.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер. М.: Наука, 1966. 688 с.

9. *Ибрагимов Л.Х.* Интенсификация добычи нефти / Л.Х.Ибрагимов, И.Т.Мищенко, Д.К.Челоянц. М.: Наука, 2000. 414 с.

10. *Кортхонджия В.П.* О природе импульсного давления, создаваемого взрывом проволоки в воде / В.П.Кортхонджия, М.О.Мдивнишвили, З.К.Саралидзе // Журнал технической физики. 2006. Т. 76. Вып. 11. С. 43-46.

11. *Кривицкий Е.В.* Динамика электровзрыва в жидкости. Киев: Наукова думка, 1966. 206 с.

12. *Кузнецов О.Л.* Преобразование и взаимодействие геофизических полей в литосфере / О.Л.Кузнецов, Э.М.Симкин. М.: Недра, 1990. 269 с.

13. *Ландау Л.Д.* Теоретическая физика: В 10 т. Т. 6. Гидродинамика / Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.

14. *Максютин А.В.* Экспериментальные исследования реологических свойств высоковязких нефтей при упругом волновом воздействии // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2009. № 5. С. 4-8.

15. *Мирзаджанзаде А.Х.* Моделирование процессов нефтедобычи. Нелинейность, неравномерность, неоднородность / А.Х.Мирзаджанзаде, Р.Н.Хасанов, Р.Н.Бахтизин. М.-Ижевск: Институт компьютерных технологий, 2004. 308 с.

16. *Молчанов А.А.* Новая эффективная технология ускоренного освоения нефтяных скважин при вводе их в эксплуатацию / А.А.Молчанов, П.Г.Агеев // Oil & Gas Eurasia. 2009. 7/8. С. 74-77.

17. *Молчанов А.А.* Плазменно-импульсное воздействие на нефтяную залежь как на многофакторную динамическую диссипативную систему / А.А.Молчанов, П.Г.Агеев // Каротажник. Тверь: АИС, 2011. Вып. 2 (200). С. 94-106.

18. *Молчанов А.А.* Плазменно-импульсное воздействие на продуктивные пласты / А.А.Молчанов, П.Г.Агеев // Oil & Gas Journal. 2008. № 9 (22). С. 42-45.

19. *Молчанов А.А.* Прогрессивные технологии, обеспечивающие дополнительное извлечение нефти и газа // Топливно-энергетические ресурсы России и других стран СНГ: Международный симпозиум 24-26 апреля 1995 г. (доп. к осн. тому) / Санкт-Петербургский горный институт. СПб, 1995. С. 25-29.

20. *Накоряков В.Е.* Волновая динамика газа и парожидкостных сред / В.Е.Накоряков, Б.Г.Покусаев, И.Р.Шрейбер. М.: Энергоатомиздат, 1990. 248 с.

21. *Наугольных К.А.* Электрические разряды в воде (гидродинамическое описание) / К.А.Наугольных, Н.А.Рой. М.: Наука, 1971. 155 с.

22. Нелинейная механика. М.: Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН, 2007. 155 с.

23. *Николаевский В.Н.* Механизм вибровоздействия на нефтеотдачу месторождений и доминантные частоты // ДАН. 1989. Т. 307. № 11. С. 570-575.

24. *Николаевский В.Н.* Геомеханика и флюидодинамика с приложениями к проблемам газовых и нефтяных пластов. М.: Недра, 1996. 448 с.

25. Патент 2373386 РФ, С/01.07.2008. Способ воздействия на призабойную зону скважины и нефтенасыщенные пласты (варианты) и устройство для его осуществления / А.А.Молчанов, П.Г.Агеев, Е.П.Большаков, Б.П.Яценко. Публ. 20.11.2009.

26. Патент 2244106 РФ, МПК Е21В43/16. Способ интенсификации добычи нефти / Д.И.Дмитриев, А.А.Молчанов, В.В.Сидора. Приоритет 10.01.2005 г.; патентообладатель Санкт-Петербургский горный институт им. Г.В.Плеханова. Публ. 10.01.2005.

27. *Пащенко А.Ф.* Плазменно-импульсная технология повышения нефтеотдачи: оценка параметров механического воздействия / А.Ф.Пащенко, П.Г.Агеев // Наука и техника в газовой промышленности. 2015. № 3 (63). С. 1-8.

28. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В.П.Дыбленко, Р.Н.Камалов, Р.Я.Шарифуллин, И.А.Туфанов. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. 381 с.

29. *Рогачев М.К.* Борьба с осложнениями при добыче нефти / М.К.Рогачев, К.В.Стрижнев. М.: Недра, 2006. 295 с.

30. *Рыскин Н.М.* Нелинейные волны / Н.М.Рыскин, Д.И.Трубецков. М.: Наука, 2013. 306 с.

31. Сейсмоакустика пористых и трещиноватых геологических сред: В 3 т. / Под ред. О.Л.Кузнецова. М.: Информационный центр ВНИИгеосистем, 2004. 998 с.

32. *Симкин Э.М.* Виброволновые и вибросейсмологические методы воздействия на нефтяные пласты / Э.М.Симкин, Г.П.Лопухов // Обзор инф. Сер. «Нефтепромысловое дело». М.: ВНИИОЭНГ, 1989. Вып. 15. С. 15-22.

33. *Юткин Л.А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986. 253 с.

34. Patent USA No.9181788 B2 Plasma source for generating nonlinear wide band, periodic, directed, elastic oscillations and system and method for stimulating wells, deposits and boreholes using the plasma source. The Positive decision dated 10.10.2015.

***Авторы*: А.А.Молчанов**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *molgeo@yandex.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **П.Г.Агеев**, *директор по стратегическому развитию*, *p.ageev@novas-energy.ru* (*Компания «NOVAS Energy Services»*, *Москва*, *Россия*).

Статья принята к публикации 11.11.2016.