
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА,
ДИАГНОСТИКА, ИСПЫТАНИЯ**

УДК 53.08

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ИМПУЛЬСНОГО
ВОЗДЕЙСТВИЯ. ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ
В ОБРАБАТЫВАЕМОЙ СРЕДЕ****© 2019 г. П. Г. Агеев¹, Н. П. Агеев², А. Ф. Пашенко^{2,3}, В. П. Касилов⁴,
С. Р. Ганиев⁴, Д. В. Курмиев^{4,*}**¹ ООО “Георезонанс”, г. Москва, Россия² ООО “Новас СК”, г. Москва, Россия³ Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва, Россия⁴ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, Россия

*e-mail: kurmenyov_dv@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2018 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

Описываются результаты и методика проведения эксперимента по определению величины импульсного давления, создаваемого генератором плазменно-импульсного воздействия в нефти. Измерения избыточного импульсного давления проводились на заданном расстоянии от оси генератора в различных образцах нефти, отличающихся физико-химическими характеристиками.

Ключевые слова: плазменно-импульсное воздействие, импульсное давление, реологические свойства нефти, усилитель заряда, осциллограмма разряда

DOI: 10.1134/S0235711919020032

Введение. В основе большого числа методов увеличения нефтеотдачи (вибрационных, волновых, гидравлических, импульсных и пр.) лежит создание значительного избыточного давления на пласт в призабойной зоне скважины. При гидроразрыве пласта, в зависимости от условий, создается давление более 30 МПа. При этом стремятся создать как можно большее давление для максимального раскрытия вновь создаваемых трещин.

Импульсные методы воздействия (гидроимпульсные, ударно-волновые [1–3], акустические и пр.) основываются на создании кратковременных импульсов давления, поэтому амплитуда создаваемого избыточного давления в импульсе имеет существенное значение. В настоящей статье рассматривается импульсное давление, создаваемое при использовании технологии плазменно-импульсного воздействия (ПИВ).

Одним из основных факторов, влияющих на очистку призабойной зоны скважины и образование вторичной трещиноватости в нефтенасыщенном пласте при плазменно-импульсном воздействии (ПИВ) является генерация периодических кратковременных импульсов высокого давления. В результате происходит декольматация призабойной зоны скважины, очистка трещин и каналов от солей, твердых частиц, ароматических углеводородов, за счет развития аномальной сети микротрещин улучшается проницаемость контура питания скважины, в работу включаются ранее не промытые пропластки и целики нефти. Одновременно снимается поверхностное натяжение жидкости в порах, капиллярах и микрокапиллярах, в результате чего нефть замещает воду и получает дополнительные возможности для фильтрации к скважине,

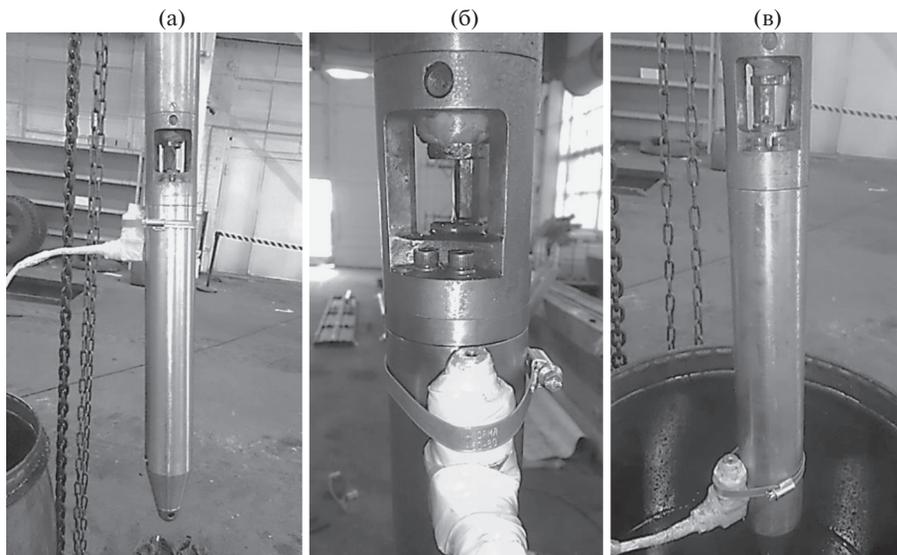


Рис. 1. Плазменно-импульсный генератор *Plasma Streamer 102* и установка датчика давления при подготовке предварительного эксперимента: (а) и (б) – расстояние от очага взрыва 50 мм; (в) – 300 мм.

а за счет возникновения резонансного эффекта происходит перераспределение двухфазной жидкости (нефть/газ–вода) по вертикали [4, 5].

В ряде предыдущих работ приводятся теоретические расчеты и оценки давления, создаваемого генератором ПИВ при электрическом разряде, проходящем через проводник и вызывающем его взрыв. В работе [6] приводится расчет создаваемого при взрыве проводника избыточного давления более 40 ГПа. Величина избыточного давления стремительно уменьшается по мере удаления от эпицентра взрыва, и, по приводимой там же оценке, может составлять на расстоянии 75 мм величину порядка 230–260 атмосфер (округленно 23–26 МПа). Основными проблемами, не позволявшими ранее экспериментально подтвердить эти оценки были чрезвычайно короткая (менее 50 микросекунд) длительность процесса и высокое значение мгновенно нарастающего фронта давления. Все это требовало тщательной подготовки измерительных средств и планирования эксперимента для достижения достоверного результата.

Методика проведения эксперимента и анализ результатов. На предварительном этапе, имеющем в качестве основной цели оценку технических решений по экспериментальным исследованиям и измерениям импульсов давления в жидкости, производимым ПИВ в лабораторных условиях, было решено провести замеры импульсов давления в емкости с водой.

Датчик давления был закреплен с помощью хомута к кожуху податчика генератора ПИВ таким образом, что расстояние от центра взрываемой проволоки до плоскости торцевой поверхности датчика в первой части эксперимента составляло 50 мм. Прибор с закрепленным датчиком был погружен в емкость с водой, при этом датчик располагался на глубине приблизительно 500 мм. Вторую часть эксперимента проводили при установке датчика на расстоянии 300 мм от центра взрываемой проволоки (рис. 1).

В общем случае величины отмеченного импульсного давления находились в пределах 100–300 бар, что в целом согласуется с теоретическими расчетами. При этом по мере удаления плоскости датчика от центра взрывающейся проволоки значения им-

пульсного избыточного давления, создаваемого взрывом проволоки, существенно снижались (в среднем в 2–2.5 раза).

В ходе предварительного эксперимента было подтверждено, что, несмотря на значительную амплитуду давления в момент взрыва проволоки в процессе ПИВ, в емкости с водой, имеющей диаметр значительно больший, чем наружный диаметр генератора ПИВ, существенного выплеска воды вверх, а также образования султана не происходило. Это опровергает утверждения некоторых исследователей, утверждающих о неизбежности данных процессов. По-видимому, это объясняется кратковременностью импульса давления и конструкцией излучателя ПИВ, обеспечивающими преимущественное распространение импульса давления в плоскости, перпендикулярной излучателю (в данном случае – горизонтальной).

Выявленные при предварительном эксперименте недостатки и особенности были проанализированы и учтены при подготовке дальнейших экспериментальных работ. Новая серия экспериментов по замеру импульсного давления, возникающего при взрыве проволоки в генераторе ПИВ проводилась сотрудниками компании “Новас” совместно со специалистами Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Научного центра нелинейной волновой механики и технологии РАН) под руководством академика Р.Ф. Ганиева в лабораторно-испытательном центре института.

Исследования проводили последовательно на трех различных по своим реологическим свойствам образцах нефти. Образец № 1 представлял собой высоковязкую нефть с динамической вязкостью 367.5–370 мПа · с, замеренной при 20°C. Нефть была предварительно дегидрирована. Образец № 2 – вязкая нефть с динамической вязкостью при 20°C: 270–280 мПа · с. Образец № 2 не подвергался никакой предварительной подготовке и имел достаточно высокое содержание водной фракции. Образец № 3 – предварительно обезвоженная сверхвысоковязкая нефть. Замеренное при 20°C значение ее вязкости составляло 2465–2490 мПа · с. Целью экспериментов были оценка интенсивности пульсаций давления в обрабатываемой среде и оценка влияния плазменно-импульсного воздействия на реологические характеристики образцов нефти (эта часть эксперимента не рассматривается в настоящей статье). При проведении эксперимента использовали следующее оборудование: плазменно-импульсный генератор *Plasma Streamer 102*; датчик динамического давления *PS-02*. Чувствительность датчика – 70 пКл/МПа; усилитель заряда *AQ07*; осциллограф *Gwinstek GDS-71054B*. Схематичное изображение примененного для исследований испытательного стенда изображено на рис. 2.

Плазменно-импульсное воздействие на испытуемую нефть осуществляли при помощи плазменно-импульсного генератора “*Plasma Streamer 102*”. Обработку проводили в цилиндрической пластиковой емкости диаметром 300 мм, расположенной вертикально и заполненной нефтью до уровня приблизительно на 100 мм ниже верхнего уровня. Плазменно-импульсный генератор был подвешен вертикально над емкостью таким образом, что нижняя часть его погружалась в обрабатываемую нефть на глубину 80–120 мм над центром излучателя.

Плазменно-импульсное воздействие в генераторе осуществляется путем подачи рабочего напряжения предварительно заряженных конденсаторов на замыкающую электроды металлическую проволоку, за счет чего происходит взрыв проволоки в жидкости. Диаметр проволоки 0.45 мм. Материал проволоки – константан. Емкость батареи конденсаторов 250 мкФ. Напряжение заряженных конденсаторов в момент, предшествующий разряду 3000 В. Время разряда, определяемое характеристиками конденсаторов 55 мкс. Энергия разряда 1125 Дж.

Для измерения импульсного давления на уровне центра излучателя ПИВ (и взрываемой проволоки) был закреплен датчик динамического давления *PS02* в герметичном корпусе. Датчик был размещен таким образом, что нормаль к его рабочей поверхности была направлена по радиусу к центру ПИВ. Расстояние между центром ПИВ и ра-

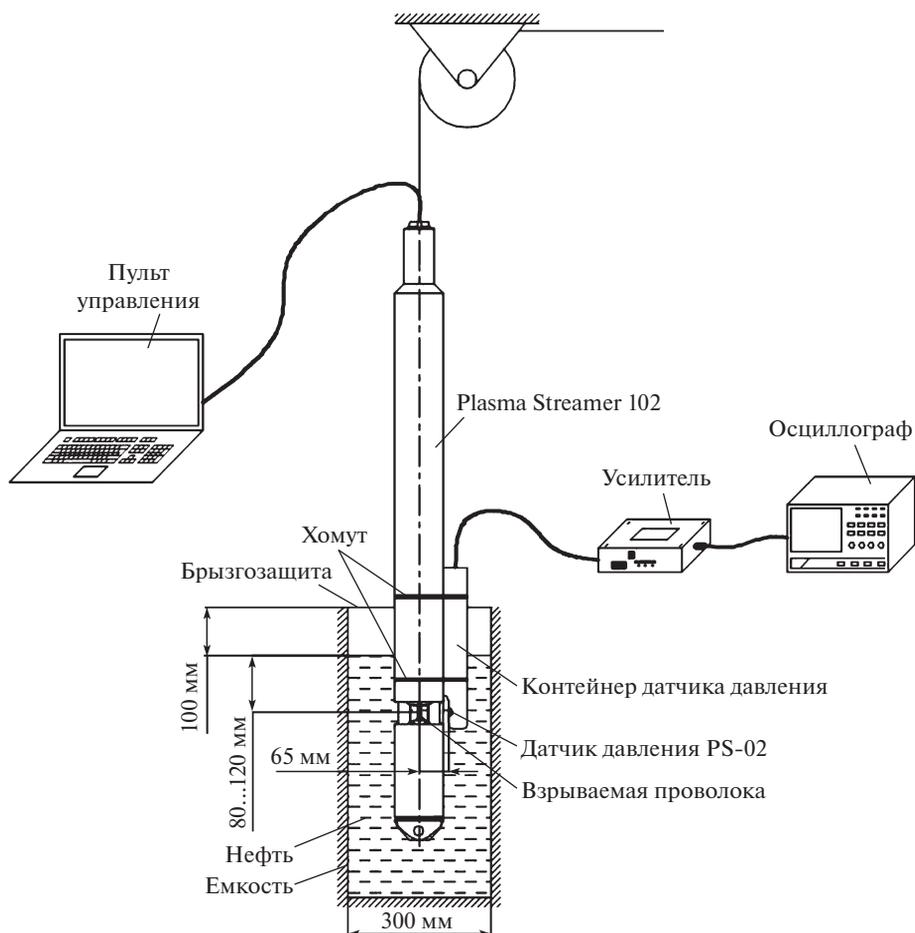


Рис. 2. Схема испытательного стенда.

бочей поверхностью датчика равно 65 мм. Сигнал датчика подавался на усилитель заряда *AQ07-01*, обеспечивающий преобразование высокоимпедансного сигнала заряда пьезоэлектрического преобразователя в низкоимпедансный сигнал напряжения.

При проведении эксперимента были установлены следующие настройки усилителя заряда: коэффициент нормирования $K_H = 7$; коэффициент усиления $K_Y = 50$; коэффициент передачи $K_H = K_Y / K_H = 7.14$.

При этих настройках, с учетом характеристик датчика, динамическому давлению жидкости на поверхности датчика 0,1 Мпа соответствует сигнал $S = 0.1 \times 70 \times 7.14 = 50$ мВ. Выходной сигнал усилителя заряда в процессе плазменно-импульсного воздействия фиксировали при помощи осциллографа. Пример осциллограммы при единичном разряде приведен на рис. 3.

Из рисунка видно, что одно деление шкалы по вертикали соответствует напряжению 2 В, или давлению 40 бар. Каждое деление шкалы по горизонтали соответствует по времени 20 микросекундам.

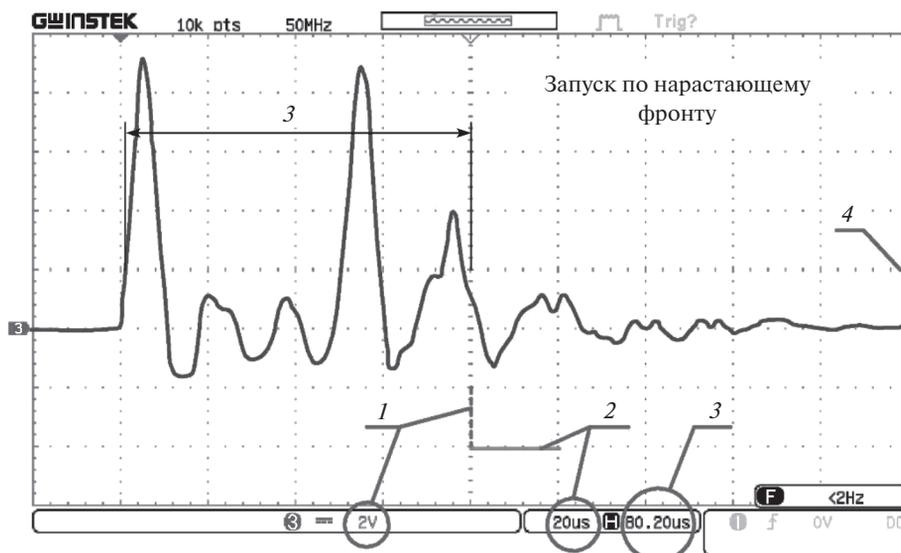


Рис. 3. Пример осциллограммы разряда с указанием масштаба измеряемых величин: 1 – масштаб сигнала по напряжению; 2 – развертка по времени; 3 – смещение момента запуска в окне осциллограммы; 4 – уровень запуска.

Динамическая погрешность при измерении быстроменяющихся, переменных и импульсных значений определяется временными параметрами исследуемого процесса, динамическими характеристиками датчика давления, преобразователя сигнала (усилителя заряда), и осциллографа. Для используемого датчика согласно градуировочной кривой, погрешность измерения давления, приведенная к верхнему пределу в диапазоне измеряемых в ходе эксперимента величин, не превышает $\pm 0.5\%$, что составляет ± 12.5 бар. Основная погрешность усилителя заряда, согласно паспортным данным, не превышает $0,5\%$ от предела настройки, что в настроенном диапазоне измеряемых давлений усилителя заряда (0–500 бар) составляет ± 2.5 бар. Погрешность канала вертикального отклонения у примененного осциллографа – не более 3% от верхнего предела измерений (в эксперименте – 250 бар), что составляет ± 7.5 атм. Таким образом, максимально возможная погрешность измерения давления в экспериментах не превышает ± 22.5 бар, что для данного вида измерений является вполне приемлемым. Погрешность установки канала горизонтального отклонения у осциллографа не превышает $\pm 0.005\%$. Собственная резонансная частота датчика ≥ 80 кГц, поэтому инерционные свойства датчика могут оказать влияние на результат только на скоростях нарастания переднего фронта сигнала, превышающих полученные приблизительно на порядок. Это делает результаты измерения временных параметров сигнала вполне достоверными с точностью осциллографа, т.е. ± 0.01 мкс.

Каждый вид исследуемой нефти был подвергнут последовательно 100 импульсам ПИВ, интервал времени между двумя импульсами составлял приблизительно 30 секунд. На рис. 4 представлены характерные осциллограммы сигнала с датчика динамического давления при плазменно-импульсной обработке исследуемых образцов нефти.

Пиковое значение давления в импульсе в момент разряда и взрыва проволоки составило порядка 180–200 атм. При этом не отмечено существенного разброса в значениях пикового давления в ходе всего эксперимента. Длительность основного (пиково-

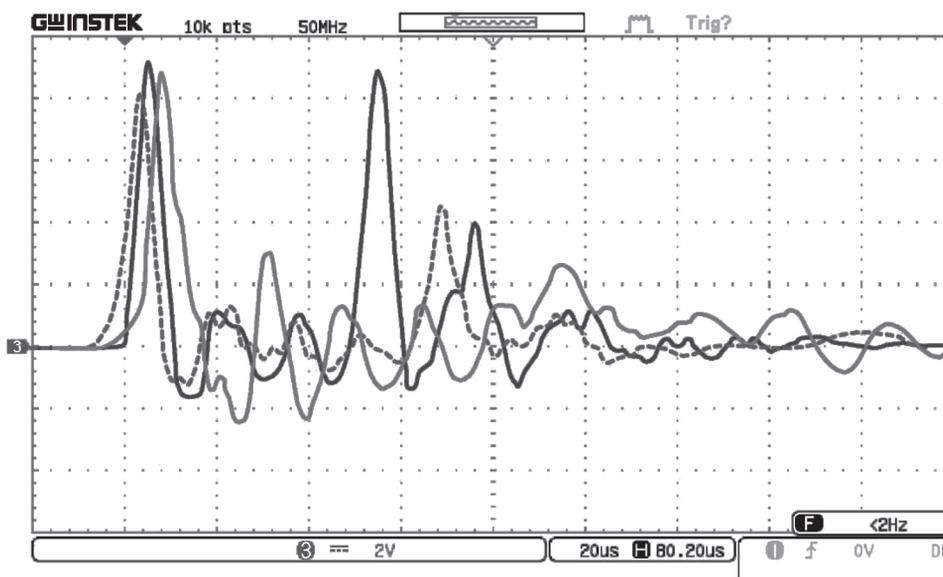


Рис. 4. Характерные осциллограммы импульсов давления в образце № 1 (сплошная темная линия), образце № 2 (пунктирная линия) и образце № 3 (сплошная светлая линия).

го) импульса давления составила в среднем от 10 до 20 микросекунд. При этом при проведении эксперимента на разных по реологическим характеристикам образцах нефти отмечается различная форма импульса давления. В большинстве экспериментов с менее вязкими образцами нефти проявляется второй пик давления, несколько меньший по амплитуде, но сравнимый с первым. В то же время, в более вязкой нефти длительность пульсации давления увеличивается и реже проявляется ярко выраженный второй пик давления. Формы осциллограмм, зарегистрированных в образце нефти № 2 имеют наибольшую вариацию. В значительной степени это связано с существенной концентрацией водной фазы в образце и с образованием в процессе воздействия водонефтяной эмульсии.

ВЫВОДЫ

1. Повторяемость результатов в течение всего эксперимента говорит о стабильном создании импульса давления при каждом разряде с аналогичными характеристиками по пиковому давлению и по продолжительности его действия.

2. Среднее значение пикового давления на расстоянии 65 мм от центра взрываемой проволоки при разряде ПИВ составляет 180–200 атмосфер.

3. В теоретических расчетах, приведенных в [6] получено значение импульса избыточного давления 230–260 атмосфер на расстоянии от центра проволоки 75 мм. С учетом принятых допущений (в качестве проводника была взята медь, в качестве окружающей среды – вода, взрываемый проводник был принят сферической формы) и точности проведенных измерений величина пикового давления в целом согласуется с результатами теоретических расчетов.

4. Во всех экспериментах длительность основного импульса давления составила около 10 мкс. Это позволяет утверждать, что мгновенная мощность, создаваемая раз-

рядом ПИВ и взрывом проволоки может превышать 10^8 Вт, поскольку $N = \frac{E}{t} = \frac{1125 \text{ Дж}}{10 \text{ мс}}$, где 1125 Дж – энергия разряда генератора ПИВ [6, 7].

5. Средняя продолжительность пульсаций давления в экспериментальных условиях составила порядка 60–70 мкс. При этом обращают на себя отличия в конфигурации осциллограмм при разрядах в различных образцах нефти. Второй пик давления, отмеченный в образцах № 1 и № 2, объясняется регистрацией ударной волны, отраженной от стенок емкости. Отсутствие в большей части экспериментов второго пика давления в образце № 3 с одной стороны, и увеличение общей длительности значимых пульсаций с другой, являются следствием существенно большей вязкости среды и свидетельствуют об отличном характере затухания колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ganiev R.F., Ukrainski L.E.* Nonlinear Wave Mechanics and Oscillatory Phenomena based on High Technologies. USA, Begell house, 2012. 527 p.
2. *Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П.* Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2014. 108 с.
3. *Ganiev O.R., Ganiev R.F., Ukrainsky L.E.* Enhanced oil recovery. Resonance macro and micro-mechanics of petroleum reservoirs. Hoboken, New Jersey: Scrivener Publishing, 2017. 240 p.
4. *Молчанов А.А., Агеев П.Г.* Плазменно-импульсное воздействие на продуктивные пласты. *Oil&Gas Journal*. 2008. № 9 (22). С. 42–45
5. *Агеев П.Г., Агеев Н.П., Агеев Д.П., Десяткин А.С., Пащенко А.Ф.* Плазменно-импульсное воздействие – инновационный подход к добыче традиционных и нетрадиционных углеводородов и заблаговременной дегазации угольных пластов // *Бурение и нефть*. 2016. № 07–08. С. 34–41.
6. *Пащенко А.Ф., Агеев П.Г.* Плазменно-импульсная технология повышения нефтеотдачи: оценка параметров механического воздействия // *Наука и техника в газовой промышленности*. 2015. № 3 (63). С. 17–26.
7. *Pashchenko A.F., Ageev P.G.* Elastic Waves and Plasma – a New Era of Enhanced Oil Recovery / *Proceedings of the International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics 2015 (ICNAAM-2015)*. New York, USA: AIP Publishing, 2016. V. 1738. P. 480053-1–480053-5.