

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ

Олег Хвощан, Ангелина Майстренко

Николаевский государственный аграрный университет  
г. Николаев, ул. Крылова 17а

**Аннотация:** Приведена методика и результаты экспериментальных исследований амплитуды и длительности импульсов давления волноводным датчиком при высоковольтных импульсных разрядах в различных средах при высоком (до 40 МПа) гидростатическом давлении

**Ключевые слова:** волноводный датчик давления, высоковольтный импульсный разряд, гидродинамические характеристики, амплитуда волны давления

### ВВЕДЕНИЕ

Теоретическими и экспериментальными исследованиями, проведенными в различных странах в последние годы, установлено, что наиболее эффективные технологии разработки трудноизвлекаемых запасов нефти основываются на комбинации известных методов воздействия на нефтяные пласты, например, физико-химических. При этом основной целью является подбор такого сочетания рабочих агентов, которое обеспечивает наиболее эффективное интегральное проявление факторов увеличения притока нефти, присущих каждому методу отдельно [1 - 6].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что эффективность высоковольтных электрических разрядов в жидкости зависит от свойств рабочей среды [7 - 9]. Для электроразрядной технологии воздействия на призабойную зону скважин (ПЗС), которая реализуется при высоких гидростатических давлениях, выбор среды, заполняющей скважину, имеет решающее значение [10 - 13]. Как показали результаты лабораторных исследований и обработка ПЗС устройствами типа "Скиф" [14, 15], электроразрядная технология не всегда обеспечивает необходимый положительный эффект, в частности, это относится к низкопроницаемым коллекторам со сниженной проницаемостью за счет выпадения асфальто-смоло-парафиновых отложений (АСПО) и отложения минеральных солей (ОМС). Одним из вариантов повы-

шения эффективности электроразрядной обработки коллекторов со сниженной проницаемостью от выпадения АСПО и ОМС может являться комплексное воздействие электрического разряда в растворах поверхностно-активных веществ (ПАВ) [16, 17].

Известно [18, 19], что искровой разряд в водных электролитах носит случайный характер ввиду большого количества факторов, влияющих на его формирование. Поэтому может наблюдаться значительный разброс основных характеристик при многочисленном повторении разряда. При многократном повторении опыта распределение характеристик разряда подчиняется нормальному закону.

Одним из основных факторов воздействия на ПЗС при электрических разрядах являются импульсы давления, возникающие после искрового разряда в межэлектродном промежутке.

**Целью работы** явились исследования влияния рабочей среды на амплитуду импульсов давления при высоковольтных импульсных разрядах.

Исследования проводились на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рис. 1. Стенд состоит из энергетической и технологической частей.

Технологическая часть (рис. 1) предназначена для физического моделирования скважинных условий и содержит камеру высокого давления (13), насос высокого давления (19), манометр (14), вентили для забора проб газов (15) и рабочей среды (16), вентили

для слива (21) и сброса давления (17), запорный вентиль (20) и бак с жидкостью (18). Забор проб жидкости производился из зоны разрядного промежутка 12, проб газа (вентиль 15) - из верхней точки и слив жидкости (вентиль 16) - из нижней точки камеры (13). Электродная система (12) типа «острие-плоскость» повторяет электродную систему устройств «Скиф».

В качестве рабочей среды при электрическом разряде использовались жидкости, которые могут быть использованы для заполнения скважин при их остановке для ремонта: водный электролит ( $\sigma_0 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ); 0,3% водный раствор НМК-21 ( $\sigma_0 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ) и водонефтяная эмульсия обводненностью  $O$  до 30% (удельное сопротивление дисперсной фазы – водного электролита  $\sigma_0 = 1,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ) с добавкой 0,3% НМК-21, в дальнейшем ВНЭ+НМК-21.

Энергетическая часть стенда предназначена для формирования импульсов тока в разрядном промежутке технологической камеры и включает в себя регулируемый автотрансформатор (1), повышающий трансформатор-выпрямитель (2), блокировки (3), зарядные резисторы (4), емкостный накопитель (5), пульт управления (6), воздушный разрядник (7), шунт (8), осциллограф (9), делитель напряжения (10), киловольтметр (11), электродную систему (12).

Исследования выполнялись при исходных параметрах экспериментальной установки, близких к номинальным параметрам устройств типа «Скиф» [20, 21]:

- емкость накопительной батареи конденсаторов  $C = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ;
- зарядное напряжение  $U = 3 \cdot 10^4 \text{ В}$ ;
- индуктивность разрядной цепи  $L = 3 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ ;
- радиус электрода-анода  $r = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Гидростатическое давление  $P_2$  в камере варьировалось в диапазоне от 0,1 до 30 МПа.

Качественная оценка импульсов давления производилась в камере высокого давления (КВД) волноводным датчиком давления (ВДД). На рис. 2

показано расположение датчика в камере относительно элементов электродной системы, которое поддерживалось неизменным для всех сред.

Оценка сигналов с ВДД при электрических разрядах выполнялась на сериях разрядов. Сигналы фиксировались на запоминающем осциллографе (схема приведена на рис. 3).

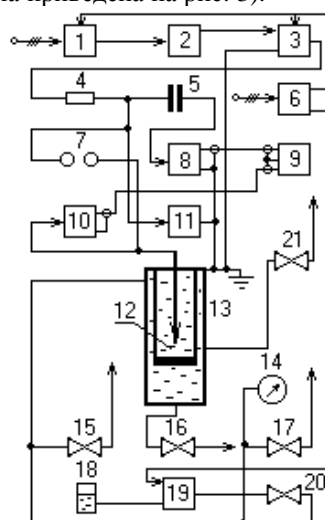


Рис. 1. Структурная схема стенда  
Fig. 1. Flow diagram of stand

Типичная форма сигналов регистрируемых импульсов давления представлена на рис. 4.

Периодический контроль характеристик ВДД производился на установке динамической калибровки широкополосных датчиков давления [22].

Форма исследуемого сигнала при разрядах в различных средах при разных гидростатических давлениях оставалась неизменной. На один канал (рис. 3) подавался сигнал, полученный с помощью коаксиального шунта (импульсный ток), на второй – импульс, снимаемый с ВДД. Производилась серия разрядов, фиксировались сигналы с разбросом амплитудного значения тока  $\pm 10\%$ . Обработка результатов в каждой точке производилась по 50 измерениям.

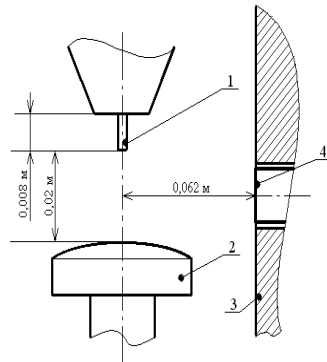


Рис. 2. Расположение волноводного датчика давления

1 – положительный электрод (анод);  
2 – отрицательный электрод (катод);  
3 – внутренняя поверхность камеры высокого давления; 4 – расположение приемного доньшка ВДД

Fig. 2. Location of waveguide sensor of pressure (WSP)

1 - positive electrode (anode); 2 - negative electrode (cathode); 3 - internal surface of chamber of high pressure; 4 - location of the receiving bottom of WSP

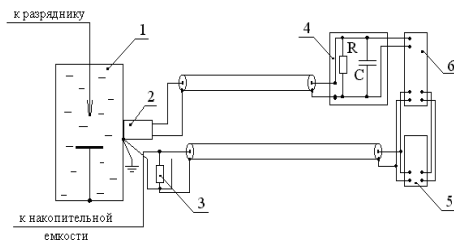


Рис. 3. Схема измерения импульсов давления ВДД

1 – камера высокого давления; 2 – волноводный датчик давления; 3 – коаксиальный шунт; 4 – RC-цепочка; 5 – генератор импульсов; 6 – запоминающий осциллограф

Fig. 3. Chart of measuring of impulses of pressure by WSP 1 - chamber of high pressure; 2 - waveguide sensor of pressure; 3 - coaxial shunt; 4 - RC-chain; 5 - generator of impulses; 6 - memorizing oscilloscope

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 5 представлена зависимость амплитуды импульса давления от гидростатического давления в КВД. В данном случае:

$$P_{m \text{ ср.}} = \sum_{i=1}^n P_{mi} / n,$$

где:  $P_{mi}$  – амплитуды импульса давления в рабочей среде при определён-

ном гидростатическом давлении;  $n$  – число импульсов ( $n = 50$ ).

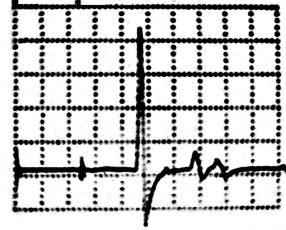


Рис. 4. Импульс, регистрируемый волноводным датчиком давления  
Fig. 4. Impulse registered by the waveguide sensor of pressure

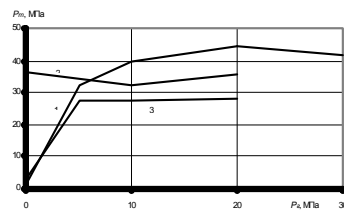


Рис. 5. Зависимость амплитуды импульса давления от гидростатического давления при электроразряде в различных средах

1 – ВНЭ+НМК-21; 2 – водный электролит,  $\sigma_0 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ; 3 – 0,3% водный раствор НМК-21

Fig. 5. Dependence of amplitude of impulse of pressure on hydrostatical pressure in different environments

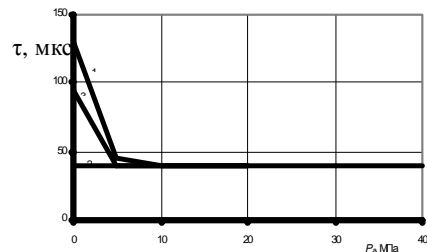


Рис. 6. Зависимость времени задержки импульса давления относительно момента начала активной стадии пробоя при изменении гидростатического давления в различных средах

1 – ВНЭ+НМК-21; 2 – водный электролит,  $\sigma_0 = 0,1 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$ ; 3 – 0,3% водный раствор НМК-21

Fig. 6. Dependence of time of delay of impulse of pressure in relation to the moment of beginning of active stage of hasp at the change of hydrostatical pressure in different environments

При атмосферном давлении в камере (рис. 5) наибольшие значения импульсного давления были зафиксированы при разряде в водном электролите (кривая 3). Практически на порядок меньшие значения импульсного давления наблюдались при разряде в водном растворе НМК-21 и ВНЭ+НМК-21. Это объясняется наличием в составе НМК-21 пенообразующих компонентов, которые в районе межэлектродного промежутка образуют большое количество газожидкостной смеси с газовыми пузырьками диаметром от 3 до 5 мм [23]. Это приводит к увеличению времени задержки  $\tau$  импульса давления относительно момента начала активной стадии пробоя (резкого нарастания тока) и, следовательно, уменьшению скорости распространения волн давления в среде. Так, если при разряде в водном электролите при всех значениях гидростатического давления, время задержки имело достаточно стабильное значение  $\tau \approx 4 \cdot 10^{-5}$  с, то при атмосферном давлении в водном растворе НМК-21  $\tau = 9,5 \cdot 10^{-5}$  с, а в ВНЭ+НМК-21  $\tau$  составляло от  $1 \cdot 10^{-4}$  до  $1,7 \cdot 10^{-4}$  с (рис. 6).

При увеличении гидростатического давления и 5 МПа ситуация изменилась. Среднее значение амплитуды импульса давления  $P_m$  в водном растворе НМК-21 достигло величины  $\sim 28$  МПа и в дальнейшем слабо зависело от изменения  $P_z$ , при этом  $\tau \approx 4 \cdot 10^{-5}$  с, что свидетельствовало об уменьшении размеров газовых включений (от 70 до 45 мкм [9]).

С увеличением  $P_z$  до 5 МПа существенно (с 3 до 32,5 МПа) возрастает  $P_m$  при разряде в ВНЭ+НМК-21 (рис. 5 кривая 1), а  $\tau$  уменьшается до  $4,5 \cdot 10^{-5}$  с. При более высоких  $P_z$  кривые 1 и 2 для ВНЭ+НМК-21 практически совпадают, достигая максимума ( $P_m \approx 45$  МПа) при  $P_z = 20$  МПа.

Необходимо отметить, что при разряде в различных средах наблюдался некоторый статистический разброс в показаниях ВДД, связанный с комплексным влиянием ряда факторов. Оценим разброс с помощью приведенных на рис. 7 гистограмм.

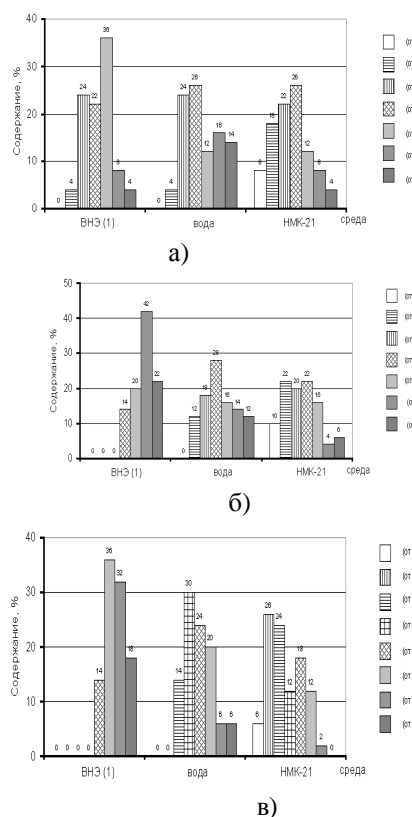


Рис. 7. Распределение амплитуд импульсов давления при электропроладе в различных средах а –  $P_z = 5$  МПа; б –  $P_z = 10$  МПа; в –  $P_z = 20$  МПа

Fig. 7. Distributing of amplitudes of impulses of pressure at an electro-digit in different environments

На рисунке 7 (а–в) изображены гистограммы распределения амплитуд импульсов давления при разряде в разных средах для конкретных значений гидростатического давления. При  $P_z = 5$  МПа (рис. 7а), несмотря на более стабильные показания датчика в ВНЭ+НМК-21, более эффективно с точки зрения гидродинамического воздействия использовать разряд в водном электролите.

Но уже при  $P_z = 10$  МПа (рис. 7б) отмечается увеличение числа разрядов с высокими  $P_m$  в ВНЭ+НМК-21 (в группу от 0,6 до  $0,9P_{m \max}$  входит 84% разрядов). В водном электролите наблюдается снижение эффективности гидродинамического воздействия (в группу от 0,6 до  $0,9P_{m \max}$  входит лишь 42% разрядов).

При  $P_z = 20$  МПа (рис. 7в) наблюдается полное преобладание, с точки зрения гидродинамического воздействия, разрядов в ВНЭ+НМК-21 (88% разрядов входят в группу с амплитудами импульсного давления от 0,7 до  $1,0P_{m \max}$ ). В то же время наибольшее количество импульсов давления в водном электролите попало в группу с амплитудами от 0,5 до  $0,8P_{m \max}$  (74% разрядов) и в группу с амплитудами от 0,3 до  $0,5P_{m \max}$  (50 % разрядов) при воздействии в водном растворе НМК-21.

### ВЫВОДЫ

1. При низких значениях гидростатического давления наибольшие амплитуды импульсного давления отмечаются при разряде в водном электролите, однако наблюдается статистический разброс в показаниях ВДД, что можно объяснить нестабильностью пространственного положения канала разряда по отношению к местоположению датчика;

2. Значительный объем газовых включений диаметром до 5 мм, образующихся при разряде в водном растворе НМК-21 и ВНЭ+НМК-21 в условиях низкого гидростатического давления, практически на порядок уменьшает амплитуду давления по сравнению с разрядом в водном электролите; с ростом  $P_z$  при снижении размера пузырьков возрастает  $P_m$ , однако в водном растворе НМК-21 гидродинамические возмущения все-таки не достигают соответствующих значений для разрядов в водном электролите;

3. При гидростатическом давлении  $P_z \geq 5$  МПа наилучшими показателями, с точки зрения гидродинамических характеристик, обладает разряд в водонефтяной эмульсии, что, по всей видимости, связано с благоприятным влиянием мелкодисперсных газовых пузырьков на стадию пробоя в практически обладающей высокими диэлектрическими показателями среде;

4. Для увеличения гидродинамического воздействия на ПЗС целесообразно в качестве рабочей среды при электрическом разряде использовать водонефтяные эмульсии с обводненностью до 30%.

5. Методика измерения гидростатического давления волноводными датчиками может быть использована как для исследования высоковольтных импульсных разрядов в жидкости, так и при экспериментальной проверке иных математических моделей расчета гидродинамических процессов в замкнутом ограниченном объеме [24, 25].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сургучёв М.Л., Кузнецов О.Л., Симкин Э.М., 1975: Гидродинамические, акустическое, тепловое циклические воздействия на нефтяные пласты.
2. Тагиев Э.И., Палий П.А., Гадиев С.Н., 1968: Виброокислотная обработка эксплуатационных и нагнетательных скважин. Нефтяное хозяйство, 2, 42 – 45.
3. Абдулин Ф. С., 1975: Повышение производительности скважин.
4. Михалюк А. Б., 1986: Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов.
5. Patent 4506734 USA, E 21 B 43/26. Fracturing Fluid Breaker System which is activated by fracture closure / Kenneth G. Nolte (USA). – № 530174; fil. 09.07.83; publ. 03.26.85.
6. Ямбаев М. Ф., 2005: Термогазовый метод увеличения нефтеотдачи. Oil & Gas Eurasia, 11, 24 – 34.
7. Наугольных К.А., Рой Н.А., 1971: Электрические разряды в воде.
8. Щерба А. А., Поклонов С. Г., Жекул В. Г., 2003: Повышение эффективности систем электрогидроимпульсной обработки посредством стабилизации электропроводности водной среды в разрядном промежутке и выбора материала для электродов. Технічна електродинаміка: Тем. вип. “Силова електроніка та енергоефективність”, 4, 108 – 112.
9. Барбашова Г. А., Сизоненко О. Н., Тафтай Э. И., Хвоцан О. В., 2004: Влияние рабочей среды в скважине на эффективность электрического разряда. Нефтяное хозяйство, 6, 90 – 92.
10. Сизоненко О.Н., Швец И.С., 2001: О возможностях использования высоковольтного электрического разряда для интенсификации притока нефти в скважину. Геотехническая механика, 25, 79 – 85.
11. Жекул В. Г., Поклонов С. Г., Трофимова Л. П., Швец И. С., 2001: Формирование электрического разряда в водонефтяных

- эмульсиях при высоких давлениях и температурах. Электронная обработка материалов, 1, 37–42.
12. Поклонов С. Г., Глушенко В. Ж., Трофимова Л. П., 1992: Эффективность электрического разряда для условий нефтяных скважин. Нефтяное хозяйство, 3, 20–23.
13. Косенков В. М., Курашко Ю. И., Швец И. С., 2002: Влияние параметров электроразрядного воздействия на динамические и фильтрационные процессы при фильтрационной зоне водозаборных скважин. Геотехнічна механіка, 35, 23–31.
14. Сизоненко О. Н., Швец И. С., 1988: Особенности электроразрядной технологии интенсификации фильтрационных процессов в нефтяных коллекторах. Современные проблемы электрофизики и электродинамики жидкостей, 137–139.
15. Shvets I. S., Kurashko Yu. I., Klimanskiy N. N., Khvoshchan O. V., 2004: Electrohydroimpulse Equipment for Increase of the Output of Oil and Intake Wells. 13<sup>th</sup> International Symposium on High Current Electronics: Proceedings, 25–30 July 2004, 409–411.
16. Сизоненко О.Н., Шерстнев Н.М., 2001: Особенности изменения фильтрационных характеристик пород-коллекторов при реагентно-импульсном воздействии. Нефтяное хозяйство, 4, 49–51.
17. Сизоненко О.Н., Хвоцан О.В., 2001: К вопросу о возможности электроразрядного улучшения фильтрационных характеристик пород-коллекторов. Импульсные процессы в механике сплошных сред: матер. IV Междунар. науч. школы–семинара, авг. 2001 г., 101–102.
18. Жекул В. Г., Загребнюк В. И., Мурзаев А. В., Хаскина Л. С., 1980: Статистическое исследование времени запаздывания пробоя при разряде в воде. Физико-механические процессы при высоковольтном разряде в жидкости, 13–18.
19. Малюшевский П. П., Сизоненко О. Н., Поклонов С. Г., 1988: Особенности начальной стадии высоковольтного пробоя жидкости при повышенном гидростатическом давлении и температуре. Электрический разряд в жидкости и его применение в промышленности: Тезисы докладов IV научно–технической конференции, сентябрь 1988, 1, 63.
20. Хвоцан О. В., Сизоненко О. Н., Курашко Ю. И., Швец И. С., 2005: К выбору параметров генератора импульсных токов установок погружного типа. Вісник Нац. техн. ун-ту “ХПІ”: Тем. вип. “Електроенергетика і перетворююча техніка”, 49, 111–118.
21. Пат. 33365 Україна, МПК (2006) E21B 43/25 H03K 3/53, 2007: Генератор імпульсних струмів заглибного свердловинного пристрою / Ю. І. Курашко, О. В. Хвоцан, В. В. Литвинов (Україна). – № у 2007 14484; заявл. 21.12.2007; опубл. 25.06.2008.
22. Теляшов Л. Л., Чеканов Ю. С., Гнатенко Е. К., 1978: Установка для динамической калибровки широкополосных датчиков давления. Физические основы электрогидравлической обработки материалов, 160–165.
23. Амиян В. А., Амиян А. В., Васильева Н. П., 1980: Вскрытие и освоение нефтегазовых пластов, 380.
24. Homyak Yu., Gutryra S., Koleuschenko A, Zajac G., 2004: A Shell Model of the Hollow Shaft for an Analysis of the Stressed State in Fitted Zone. MOTROL, 6, 101–107.
25. Kovalyshyn S. Yo., Tomjuk V. V., 2011: Optimization of Oil Press Parameters. MOTROL, 13, 173-182.

#### EXPERIMENTAL RESEARCH OF HYDRODYNAMIC DESCRIPTIONS OF HIGH-VOLTAGE IMPULSIVE DIGITS

**Abstract.** A method and results of experimental researches of amplitude and duration of impulses of pressure by a waveguide sensor at high-voltage impulsive digits in different environments at high (up to 40 MPa) hydrostatical pressure is resulted

**Key words:** waveguide sensor of pressure, high-voltage impulsive digit, hydrodynamic descriptions, amplitude of wave of pressure.