

## МЕХАНИКА МАШИН

УДК 532.5;532.517

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ  
ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН  
С ПОМОЩЬЮ ДЕТОНАЦИИ СМЕСИ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА**© 2021 г. Р. Ф. Ганиев<sup>1,\*</sup>, И. Н. Гришняев<sup>1</sup>, Г. П. Лысенко<sup>1,2</sup>, Л. Е. Украинский<sup>1,\*\*</sup><sup>1</sup> *Институт машиноведения им А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия*<sup>2</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия**\*e-mail: sekretar@imash.r**\*\*e-mail: ukrainsky@nwmic.ac.ru*

Поступила в редакцию 26.06.2020 г.

Принята к публикации 22.10.2020 г.

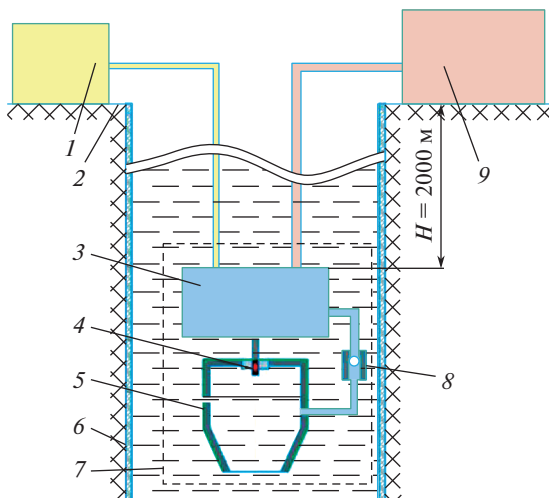
Установлены научные основы генерирования интенсивных гидроакустических волн в жидкости в результате детонации стехиометрической смеси водорода и кислорода. Высказана идея о возможности осуществления указанного процесса с помощью глубоководного электролизера, которая подтверждена экспериментально. Методами математического моделирования исследованы процессы горения и детонации объема стехиометрической смеси водорода и кислорода, окруженного жидкой средой, начальные условия повышения давления и температуры на границе раздела “продукты детонации–жидкая среда” в момент взрыва, обеспечивающие возникновение и распространение гидроакустической волны в жидкой среде. Оценена зависимость пикового давления полученной волны, длительности ее положительной фазы и длительности первого периода волны от объема водорода и кислорода, давления и других параметров. Показана возможность использования установленного эффекта для повышения нефтеотдачи пластов в нефтегазодобыче.

*Ключевые слова:* электролиз, детонация, ударные волны в нефтяных пластах

DOI: 10.31857/S0235711921010119

В нефтегазодобывающей промышленности главным направлением технического прогресса являются с одной стороны интенсификация процесса добычи, а с другой – увеличение процента извлекаемых пластовых запасов. Как известно [1], обе эти задачи можно решить методами волновой технологии. Например, гидроакустические волны возбужденные проточными гидродинамическими генераторами в призабойной зоне скважины, позволяют интенсифицировать приток нефти, а высокоамплитудные волны, возбужденные ударно-волновыми генераторами, действующими на основе станков-качалок, воздействуя на удаленные области пласта, могут способствовать повышению нефтеотдачи [1]. В настоящей статье анализируется возможность использования для решения обозначенных задач детонации стехиометрической смеси кислорода и водорода.

Оба упомянутых эффекта (интенсификация притока и повышение нефтеотдачи) достигаются также с помощью гидроразрыва пласта (ГРП). В широко распространенных в настоящее время промышленных методах ГРП воздействие на пласт осуществляется с помощью приложения значительного статического давления. Возможно ли осуществить ГРП с помощью быстро изменяющихся во времени интенсивных волн,



**Рис. 1.** Схема расположения генератора гидроакустических волн в области нахождения продуктивного нефтяного пласта: 1 – источник питания электролизера и свечи зажигания; 2 – уровень Земли; 3 – прибор для осуществления электролиза воды (электролизер); 4 – свеча зажигания; 5 – камера сгорания смеси водорода и кислорода (камера высокого давления – КВД); 6 – обсадная колонна нефтяной скважины; 7 – генератор гидроакустических волн в сборе (без источника питания); 8 – обратный клапан; 9 – резервуар с электролитом.

распространяющихся по пласту? Как их возбудить на практике? Статья также посвящена изучению этих вопросов.

Рассмотрим возможность использования для создания гидроакустических волн глубоководного электролизера, вырабатывающего порции стехиометрической смеси водорода и кислорода при высоком давлении и обеспечивающего детонацию полученной смеси.

### 1. Глубоководный импульсный электролизер для генерации гидроакустических волн.

С целью проведения экспериментальных исследований были разработаны конструктивные элементы и макет глубоководного импульсного электролизера (ГИЭ), предназначенного для работы в нефтяных скважинах глубиной несколько километров, где давление воды и нефти может достигать сотни атмосфер. Для проверки работоспособности ГИЭ был создан стенд, имитирующий его работу в области нахождения продуктивного нефтяного пласта на глубине  $\sim 2$  км.

Основными элементами глубоководного импульсного электролизера, предназначенного для создания гидроакустических волн в области нахождения продуктивного нефтяного пласта, являются (рис. 1): генератор стехиометрической смеси водорода и кислородом 3, основанный на электролизе воды (в дальнейшем называемый электролизером); камера сгорания смеси водорода и кислорода при высоком давлении 5; калильная свеча зажигания 4, обеспечивающая инициирование горения водорода в кислороде за счет поданного на нее постоянного напряжения.

Работа ГИЭ в скважине заключается в следующем. При подаче питания на электролизер 3 в камеру сгорания 5 через трубопровод, снабженный обратным клапаном 8, начинает поступать смесь водорода и кислорода, вытесняя воду из полости. Калильный элемент свечи 4 выходит из воды, раскаляется и инициирует горение, переходящее в детонацию. При этом за счет повышения давления, обратный клапан 8 закрывается и изолирует полость электролизера от газообразных продуктов реакции. После

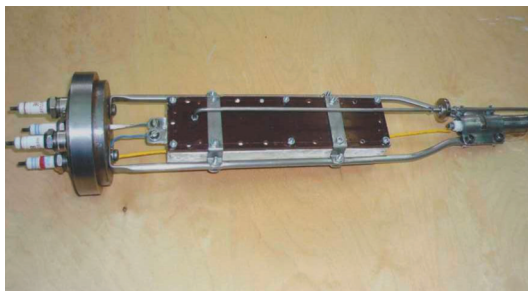


Рис. 2. Внешний вид макета ГИЭ в сборе с электролизером и камерой сгорания.

окончания процесса детонации продукт реакции (водяной пар) конденсируется, и камера сгорания заполняется водой. Это обеспечивает охлаждение капильного элемента свечи. Процесс повторяется, что обеспечивает генерирование ГИЭ последовательности импульсов. Количество импульсов определяется объемом электролита, находящегося в резервуаре 9 на поверхности земли.

В ходе экспериментальных исследований была отработана конструкция макета ГИЭ, рассчитанного на внешнее давление окружающей водной среды до 20 МПа [2] и выдерживающего без разрушения ударные волны, возникающие при сгорании водородо-кислородной смеси. Его внешний вид показан на рис. 2.

Считая кислородно-водородную смесь идеальным газом, при объеме камеры сгорания в  $2.5 \text{ см}^3$  и при внешнем давлении 20 МПа можно согласно закону электролиза Фарадея вычислить массу выделившихся газов, а следовательно, и время, между заполнением камер сгорания. Принимая, что в жидкости, окружающей камеру сгорания, растворено максимально возможное количество кислорода и водорода минимальное время между микровзрывами, при рассматриваемых условиях, при токе электролиза 10 А, составит  $\sim 4$  мин.

Разработанный, изготовленный и исследованный на стенде при давлении 15 МПа макет глубоководного импульсного электролизера благодаря совмещению источника водорода и кислорода с камерой сгорания, разработке специального электролизера и рациональной компоновке имеет характерный размер  $\sim 100$  мм. За счет этого он технологически удобен для использования в нефтедобывающей промышленности и в частности, в обсадных колоннах скважин диаметром 170 мм.

**2. Математическое моделирование генерации гидроакустических волн глубоководным импульсным электролизером.** Для исследования возникающей гидроакустической волны представим рассматриваемый процесс в виде двух этапов: в ходе первого этапа происходит реакция окисления водорода, и распространение детонационной волны по стехиометрической смеси; на втором этапе идет распад взрыва, образование и распространение гидроакустической волны. Первый этап происходит в камере высокого давления (рис. 1, поз. 5), а второй – в области низкого давления (ОНД) (область жидкости вне камеры сгорания).

Стехиометрическая смесь водорода с кислородом вырабатывается электролизером в пропорции  $0.667\text{H}_2 + 0.333\text{O}_2$ .

*Оценка параметров детонационной волны, распространяющейся в КВД.* Физико-математическое моделирование поведения смеси  $0.667\text{H}_2 + 0.333\text{O}_2$  в процессе горения является актуальной проблемой. Здесь представляется обоснованным применение некоторых кинетических моделей процессов воспламенения и последующего сверхзвукового горения газовых смесей, которые дают достоверную информацию о динамике

превращений по мере развития реакции и адекватно описывают процесс, как на стадии воспламенения, так и на стадии горения.

При моделировании реакции окисления водорода можно воспользоваться детальными кинетическими механизмами, приведенными в [3] и представляющими достаточно полный механизм горения водорода в кислороде с границами разброса значений констант скоростей прямых и обратных реакций и ролью этих реакций в процессе.

Чисто формально стехиометрическое уравнение взаимодействия водорода с кислородом можно представить в виде прямой тримолекулярной реакции



Действительный механизм отличен от (1) и является сложным химическим процессом взаимодействия водорода с кислородом, имеющим ряд специфических особенностей, например, в зависимости [4]: 1) от начальной температуры и стехиометрии ведущий механизм процесса может быть цепно-тепловым, цепным разветвленным, цепным неразветвленным и даже неценным (тепловым); 2) от начального давления процесс может иметь либо гомогенный, либо гомогенно-гетерогенный характер; 3) от начальных температур и давления процесс может демонстрировать один, два, три и даже четыре предела самовоспламенения (“четвертый предел” носит вырожденный характер) и т.д.

Все это позволяет рассматривать окисление водорода как модельный процесс, который описывается атомной матрицей, каждая строка которой дает число атомов отдельных элементов, входящих в определенное (одно и то же) вещество, а каждый столбец показывает число атомов определенного (одного и того же) элемента, входящих в каждое сложное молекулярное соединение, участвующее в процессе [3]

$$A = \begin{pmatrix} \text{H} & \text{O} & \text{OH} & \text{HO}_2 & \text{H}_2\text{O} & \text{H}_2\text{O}_2 & \text{O}_2 & \text{H}_2 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 2 & 2 & 0 \end{pmatrix} \left\{ \begin{matrix} H \\ O \end{matrix} \right\}. \quad (2)$$

Атомная матрица (2), включает восемь химических компонентов:  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  и ее можно разложить на уравнения состояния прямых и обратных реакций, представленных в табл. 1 [3]. В табл. 1 вещество  $M$  может принимать значение одного из химических компонентов матрицы (2). Общим для этого типа реакций являются скорости прямой и обратной реакции [3].

При моделировании процессов горения водорода встает вопрос о выборе кинетического механизма горения. В [5] и [6] использовались кинетические схемы, состоящие из 42 и 38 реакций, включенных в табл. 1. При этом наиболее полный механизм окисления водорода в воздухе включает в себя 308 прямых и обратных реакций [7], а водорода в кислороде 60 реакций, представленных в табл. 1.

В общем виде стехиометрические уравнения реакций табл. 1 можно записать в виде [3]

$$\sum_{i=1}^{\mu} v_{ij} A_i = \sum_{i=1}^{\mu} v_{ij}^r A_i^r,$$

где  $A_i$  – химические символы исходных реагирующих веществ;  $v_{ij}$  – стехиометрические коэффициенты;  $\mu$  – количество компонентов в смеси (для рассматриваемого случая  $\mu = 8$ );  $r$  – обозначены величины, относящиеся к продуктам реакции; индексом  $j$  – номер реакции. Если химический компонент  $i$  не является исходным продуктом (продуктом реакции), соответствующий стехиометрический коэффициент равен нулю.

**Таблица 1.** Реакции, протекающие при окислении водорода в кислороде

1	$H_2 + O_2 \leftrightarrow 2OH$	16	$HO_2 + H \leftrightarrow 2OH$
2	$OH + H_2 \leftrightarrow H_2O + H$	17	$HO_2 + H \leftrightarrow H_2O + O$
3	$H + O_2 \leftrightarrow OH + O$	18	$HO_2 + H \leftrightarrow H_2 + O_2$
4	$O + H_2 \leftrightarrow OH + H$	19	$HO_2 + O \leftrightarrow OH + O_2$
5	$O + H_2O \leftrightarrow 2OH$	20	$H + H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + OH$
6	$2H + M \leftrightarrow H_2 + M$	21	$O + H_2O_2 \leftrightarrow OH + O$
7	$2O + M \leftrightarrow O_2 + M$	22	$H_2 + O_2 \leftrightarrow H_2O + O$
8	$H + OH + M \leftrightarrow H_2O + M$	23	$H_2 + O_2 + M \leftrightarrow H_2O_2 + M$
9	$2OH + M \leftrightarrow H_2O_2 + M$	24	$OH + M \leftrightarrow O + H + M$
10	$O + OH + M \leftrightarrow H_2O + M$	25	$HO_2 + OH \leftrightarrow H_2O + O_2$
11	$H + O_2 + M \leftrightarrow HO_2 + M$	26	$H_2 + O + M \leftrightarrow H_2O + M$
12	$HO_2 + H_2 \leftrightarrow H_2O_2 + H$	27	$O + HO_2 + M \leftrightarrow H_2O + M$
13	$HO_2 + H_2 \leftrightarrow H_2O + OH$	28	$O + H_2O_2 \leftrightarrow H_2O + O_2$
14	$HO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2O_2 + OH$	29	$H_2 + H_2O_2 \leftrightarrow 2H_2O$
15	$2HO_2 \leftrightarrow H_2O_2 + O_2$	30	$H + HO_2 + M \leftrightarrow H_2O_2 + M$

Молярно-объемная скорость образования компонента  $i$  в  $j$ -реакции выражается формулой [3]

$$R_{ij} = (v_{ij}^r - v_{ij}) \left[ v_{+j} \prod_{i=1}^{\mu} W_i^{v_{ij}} - v_{-j} \prod_{i=1}^{\mu} W_i^{v_{ij}^r} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $v_{+j}$ ,  $v_{-j}$  – скорости прямой и обратной  $j$ -реакций;  $W_i^{v_{ij}} = \rho_i / M_i$  – молярно-объемная концентрация компонента  $i$ , моль/м<sup>3</sup>;  $\rho_i = \xi_i \rho$  – парциальная плотность компонента  $i$ ;  $M_i$  – молекулярная масса компонента  $i$ ;  $\xi_i$  – относительная массовая концентрация компонента  $i$ ;  $\rho = \sum_{i=1}^{\mu} \rho_i$  – плотность смеси. При этом уравнения химической (равновесия) кинетики для молярно-объемных концентраций принимают вид [3]

$$\frac{dW_i}{dt} = \sum_{j=1}^l R_{ij},$$

где  $l$  – количество реакций (в рассматриваемом случае  $l = 60$ ).

В итоге изменения относительных массовых концентраций компонентов находятся из решения уравнений химической кинетики [8]

$$\frac{d\xi_i}{dt} = \frac{1}{\rho} M_i \left\{ \sum_{j=1}^l \rho^{m_j} (v_{ij}^r - v_{ij}) \left[ v_{+j} \prod_{i=1}^{\mu} \left( \frac{\xi_i}{M_i} \right)^{v_{ij}} - v_{-j} \prod_{i=1}^{\mu} \left( \frac{\xi_i}{M_i} \right)^{v_{ij}^r} \right] \right\}, \quad (4)$$

где  $m_j$  – порядок  $j$ -й реакции.

Кинетические уравнения необходимо дополнить уравнением состояния для многокомпонентной смеси [8]

$$p = \rho TR \sum_{i=1}^{\mu} \frac{\xi_i}{M_i}. \quad (5)$$

С помощью уравнений (4) и (5) при заданных  $p$  и  $T$  можно рассчитать равновесные параметры имеющейся стехиометрической смеси.

Для расчета параметров детонационной волны необходимо воспользоваться уравнениями неравновесной газовой динамики – законами сохранения массы, импульса и энергии в одномерной постановке [8]

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E + p)u}{\partial x} &= 0,\end{aligned}\tag{6}$$

где  $E = e + u^2/2$  – полная энергия;  $u, p, e$  – скорость, давление и внутренняя энергия смеси соответственно. Внутренняя энергия реакционно-способной смеси определяется из соотношения

$$e = c_v T + \sum_{i=1}^{\mu} \xi_i h_{0i} - c_p T_{00},$$

где  $c_p, c_v$  – удельные теплоемкости смеси при постоянном давлении и постоянном объеме,  $c_p = \sum_{i=1}^{\mu} c_{pi} \xi_i$ ;  $c_v = \sum_{i=1}^{\mu} c_{vi} \xi_i$ ;  $h_{0i}$  – энтальпия образования компонента  $i$ ,  $T_{00} = 298$  К. Решая систему уравнений (6) численными методами можно определить параметры детонации.

Для упрощения расчетов систему уравнений (6) можно представить в виде соответствующих условий на поверхности волны – непрерывности потока вещества, потока импульса и потока энергии [9]

$$\begin{aligned}\rho_0 u_0 &= \rho u, \\ p_0 + \rho_0 u_0^2 &= p + \rho u^2, \\ \frac{h_0}{M_0} + \frac{u_0^2}{2} &= \frac{h}{M} + \frac{u^2}{2}.\end{aligned}\tag{7}$$

В последнем уравнении энтальпия неидеального газа  $h$  связана с идеальной  $h_n$  соотношением [9]

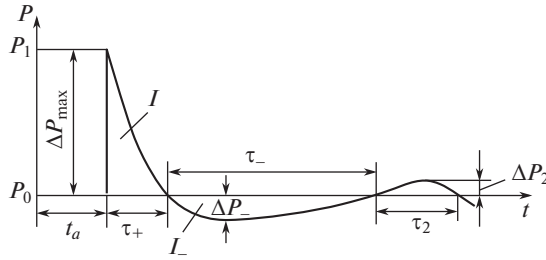
$$h = h_n + \frac{\alpha \rho}{M} - RT + M \frac{p}{\rho},\tag{8}$$

где  $\alpha$  – константа Ван-дер-Ваальса,  $u, u_0$  – скорости газового потока до и после фронта детонационной волны.

Можно предположить, что объем взрыва в нашем случае не изменяется, так, как происходит в КВД. Тогда процесс носит адиабатический характер и его параметры ( $\rho, p, T$ ) находятся из решения системы уравнений табл. 1, описывающих кинетический механизм окисления водорода, и уравнения состояния многокомпонентной смеси при постоянной внутренней энергии, что для неидеального газа записывается в виде [8]

$$\frac{h_{0n} - \frac{\alpha_0 \rho_0}{M_0} - RT_0}{M_0} = \frac{h_n - \frac{\alpha \rho}{M} - RT}{M},\tag{9}$$

где индекс “0” обозначает параметр при начальном состоянии системы.



**Рис. 3.** Схема измеряемых параметров взрывной волны:  $t_a$  – время прихода;  $\tau_+$  – длительность положительной фазы;  $\tau_-$  – длительность волны разгрузки;  $\Delta P_{\max}$  – амплитуда волны давления;  $\Delta P_-$  – амплитуда волны разрежения;  $I$  – импульс фазы сжатия;  $I_-$  – импульс фазы разрежения;  $\Delta P_2$  и  $\tau_2$  – вторичный подъем давления и его длительность.

Используя систему уравнений (7)–(9), а также исходные данные для термодинамических расчетов, приведенные в работе [10], можно рассчитать параметры детонационной волны в КВД. Таким образом, мы можем использовать один из двух описанных выше подходов.

**Оценка параметров гидроакустической волны, распространяющейся в ОНД.** Фугасное воздействие водородосодержащих горючих смесей определяется уровнем давления и импульса в волне давления, порождаемой взрывным превращением. При этом уровень давления в ударной волне будет характеризовать вариант воздействия на продуктивный слой: волновое воздействие или гидроразрыв пласта с образованием трещин, а импульс в волне давления – длину волнового воздействия или длину образующихся трещин. На рис. 3 представлена схема измеряемых параметров взрывной волны [4].

В случае подводного взрыва сферической газовой смеси с энергией  $e = qV$ , где  $V$  – объем,  $q$  – объемная плотность энергии взрывающейся смеси, амплитуду взрывной волны в МПа по измерениям [11, 12] на относительном расстоянии  $r/r_0 > 2$  можно найти из соотношения

$$\Delta P = (0.149 \pm 0.006) q^{2/3} \Lambda^{-1}, \tag{10}$$

где  $r$  – расстояние до точки измерения амплитуды ударной волны,  $r_0$  – радиус облака стехиометрической смеси;  $\Lambda$  – приведенное расстояние, определяемое как  $\Lambda = r/e^{1/3}$ .

Закономерности поля давлений взрыва в полузамкнутом объеме качественно следуют закономерностям сферического взрыва. Тогда для камер с малым удлинением  $l/d < 3$  (характерно для КВД), где  $l$  – длина камеры,  $d$  – ее диаметр, экспериментальная зависимость (10) будет иметь другую константу [4]

$$\Delta P = (0.062 \pm 0.006) q^{2/3} \Lambda^{-1}. \tag{11}$$

Объемная плотность энергии при газовом взрыве смеси с плотностью  $\rho_0$  находится как

$$q = P_v / (\gamma - 1),$$

или, приближенно, с использованием параметров детонации [4]

$$q = 0.5 \rho_0 D^2 (\gamma^2 - 1)^{-1} (1 - M^{-2}). \tag{12}$$

Здесь  $P_v$  – давление взрыва;  $\gamma$  – отношение удельных теплоемкостей продуктов взрыва;  $D$  – скорость детонации;  $M$  – число Маха детонационной волны в полости.

Размерность основных величин в формуле для  $\Delta P$  такова:  $q$  – МДж/м<sup>3</sup>;  $\Lambda$  – м/МДж<sup>1/3</sup>;  $e$  – МДж.

Зависимость импульса давления  $I$  от расстояния при детонации газовой смеси в подводной сферической полости установлена в [11, 12] и, если  $I$  измерять в Па·с, имеет вид

$$I/e^{1/3} = 3190\Lambda^{-1/3}.$$

Объемная плотность энергии взрываеваемой смеси  $q$ , это ее теплотворная способность. При этом под теплотворной способностью вещества понимают количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 м<sup>3</sup> газообразного взрывчатого вещества (в нашем случае смеси водорода с кислородом).

Различают высшую и низшую теплотворные способности. Если вода, содержащаяся в топливе и образовавшаяся при сгорании водорода, присутствует в конечных продуктах сгорания в виде жидкости, то количество выделившейся теплоты характеризует высшую теплотворную способность; если же вода присутствует в виде пара, то теплотворную способность называют низшей. Высшая теплотворная способность водорода равна 13 МДж/м<sup>3</sup> для сгорания при постоянном давлении 1 бар и температуре 0°C [13]. Низшая теплотворная способность его составляет 10.8 МДж/м<sup>3</sup> или 2575 ккал/м<sup>3</sup>. Обычно в расчетах используют значение низшей теплотворной способности (теплоты сгорания).

**3. Расчет параметров гидроакустической волны, создаваемой глубоководным импульсным электролизером на продуктивном слое.** С учетом приведенных выше выражений и данных, представленных в [3, 4, 9, 11, 12] оценим параметры детонационной и гидроакустической волн, порождаемой взрывом стехиометрической смеси водорода с кислородом, вырабатываемой разработанным глубоководным импульсным электролизером.

В качестве исходных данных примем: 1) детонация происходит в полузамкнутом объеме КВД  $V_0 = 2.5 \times 10^{-6}$  м<sup>3</sup>, полностью заполненном (до обреза) в момент, предшествующий подрыву, стехиометрической смесью водорода с кислородом в пропорции  $0/667\text{H}_2 + 0/333\text{O}_2$ ; 2) перед инициированием подрыва смесь водород–кислород имеет начальное давление  $p_0 = 0.5\text{--}50$  МПа и температуру  $T_0 = 300$  К; 3) камера высокого давления имеет размеры в следующей пропорции  $l/d < 3$ ; 4) параметры гидроакустической волны рассчитываются на расстоянии 0.09 м от границы раздела стехиометрическая смесь/вода, что обеспечивает выполнение условия  $r/r_0 > 2$ ; 5) гидроакустическая волна распространяется в жидкости с плотностью 1000 кг/м<sup>3</sup>.

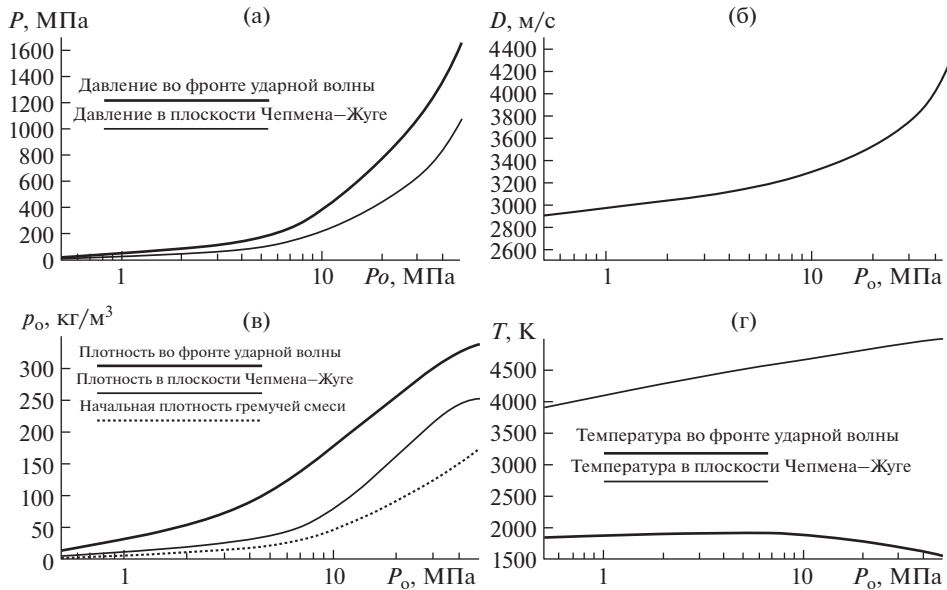
На рис. 4 представлены параметры детонационной волны, генерируемой в КВД, а на рис. 5 параметры гидроакустической волны, распространяющейся в ОНД.

**4. Оценка возможности использования глубоководного импульсного электролизера для повышения нефтеотдачи пластов.** Рассмотрим возможность применения ГИЭ для создания волнового воздействия на всю залежь или большой ее участок. Эффективность в этом случае будет определяться параметрами генерируемых ГИЭ волн (амплитуда, частота, глубина установки электролизера, выбор излучающей скважины) [1, 13].

Основная цель рассматриваемого здесь волнового воздействия на пласт – обеспечить повышение подвижности нефти в заводненных пластах путем коалесценции мелких капель нефти в крупные образования и повышения тем самым фазовой проницаемости. Для пластов с малой обводненностью интенсивные волны могут способствовать вовлечению в добычу некоторого количества так называемой матричной нефти из мелких пор пластов, которая обычно остается в пластах.

Применение таких методов позволяет достичь заметной интенсификации фильтрационных процессов в пластах и повышения их нефтеотдачи в широком диапазоне амплитудно-частотной характеристики режимов воздействия. При этом положительный





**Рис. 4.** Параметры детонационной волны, генерируемой в КВД в зависимости от начального давления  $P_0$ : (а) – давление во фронте детонационной волны и в плоскости Чепмена–Жуге; (б) – скорость детонационной волны; (в) – плотность продуктов детонации во фронте ударной волны, в плоскости Чепмена–Жуге и начальная плотность взрывчатой смеси  $0.667\text{H}_2 + 0.333\text{O}_2$ ; (г) – температура во фронте детонационной волны и в плоскости Чепмена–Жуге.

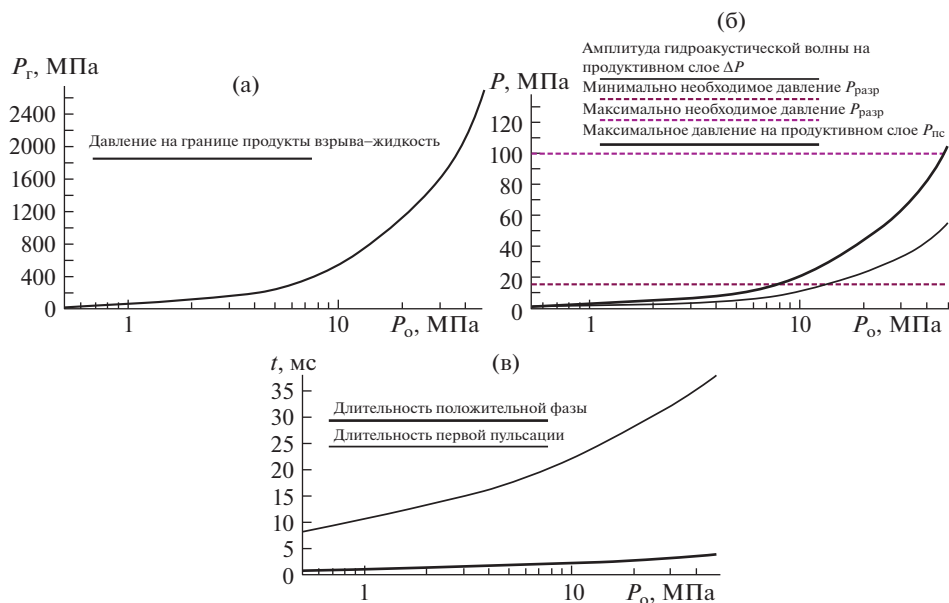
эффект волнового воздействия обнаруживается как в непосредственно обрабатываемой скважине, так и в отдельных случаях, при соответствующих режимах обработки проявляется в скважинах, отстоящих от источника импульсов давления на сотни и более метров [1, 14, 15].

Для реализации указанного способа обработки ГИЭ должен устанавливаться в одной из скважин выбранного участка месторождения, а воздействие осуществляется на окружающие скважины. Как свидетельствуют результаты обработок нефтяных месторождений, проведенных по описанной схеме с помощью генератора ударных волн, возможно увеличение нефтедобычи на десятки процентов по сравнению с исходным значением в момент начала обработки [1]. При этом реагирующие скважины находятся на расстоянии до 800 м от центра установки генератора.

Положительный эффект воздействия достигается при создании на входе в пласт импульсов давления амплитудой  $\sim 8\text{--}12$  МПа [1]. Используя полученные расчетные данные, приведенные на рис. 5, можно показать, что такое давление ГИЭ создает на продуктивном слое уже при начальном давлении окружающей скважинной жидкости  $P_0 \sim 2$  МПа. С ростом  $P_0$  давление, развиваемое на границе жидкость–продуктивный слой  $P_{nc}$ , начинает значительно его превышать.

Это позволяет предположить возможность использования ГИЭ в процессах повышения нефтеотдачи пластов как менее металлоемкое и более удобное в использовании по сравнению с оборудованием, применяемым в настоящее время для этих целей.

**5. Оценка возможности использования глубоководного импульсного электролизера для проведения гидроразрыва пласта.** Что касается гидравлического разрыва пласта, то его используют для воздействия на пласты, характеризующиеся низкой проницаемостью.



**Рис. 5.** Параметры гидроакустической волны распространяющейся в ОНД, в зависимости от начального давления  $p_0$ : (а) – давление гидроакустической волны на границе раздела продукты взрыва–жидкость  $P_T$ ; (б) – максимальное давление  $P_{пс}$  и амплитуда гидроакустической волны  $\Delta P$ , развиваемые на границе жидкость–продуктивный слой; (в) – длительности положительной фазы и первой пульсации гидроакустической волны на границе жидкость–продуктивный слой.

Разрыв приводит к увеличению дренируемого участка, в результате чего фильтрационные процессы и нефтеотдача пласта увеличиваются.

Оценим возможность использования ГИЭ в процессах гидроразрыва пласта для локального воздействия на пласт при интервальном охвате пластов [16].

Использование ГИЭ для гидроразрыва пласта может быть подобно изложенному в [17], где заряд взрывчатого вещества опускался в скважину, переводился в рабочее состояние (подрывался) и генерировал воздействие жидкости на продуктивный слой.

Гидроразрыв пласта задается давлением гидроразрыва пласта  $P_{разр}$  – это давление, которое необходимо создать в зоне залегания пласта для раскрытия естественных и образования новых трещин (каналов). То есть для расслоения пласта и образования в нем горизонтальной трещины, необходимо внутри пористого пространства создать давление  $P_{разр}$ , превышающее горное на величину временного сопротивления горных пород на разрыв, так как надо преодолеть силы сцепления частиц породы. Давление гидроразрыва пласта можно определить из выражения [18]

$$P_{разр} = P_{гв} - P_{пл} + P_p, \quad (13)$$

где  $P_{гв}$  – вертикальное горное давление;  $P_{пл}$  – пластовое давление;  $P_p$  – давление расщепления пород (давление распространения трещины). При этом разницу  $(P_{гв} - P_{пл})$  еще называют горизонтальной составляющей горного давления  $P_{гг}$ .

При полном отсутствии промысловых данных и данных исследований допускается использование эмпирических зависимостей. Например, в [19] приведена зависимость

$$P_{разр} = 10^4 H_{п} K, \quad (14)$$

где  $K = 1.5-2$ ;  $H_{п}$  – в метрах,  $P_{разр}$  – в Па.

Воспользовавшись формулой (14) найдем изменение давления гидроразрыва пласта для глубин 1–5 км —  $P_{\text{разр}} = 15\text{--}100$  МПа. Для более точной оценки можно воспользоваться методикой, изложенной в [20]. Так, в этой работе для конкретных залежей нефти показано, что  $P_{\text{разр}} = 42.4$  МПа на глубине 3150 м, что отличается от расчетов по формуле (14) на ~15%.

Из представленных на рис. 5 графиков видно, что гидроакустическая волна, создаваемая продуктами взрыва стехиометрической смеси водород–кислород, будет развивать давление достаточное для расслоения продуктивного слоя традиционными способами уже при начальном давлении скваженной жидкости  $p_0 = 4.5$  МПа. При этом на границе раздела жидкость–продуктивный слой можно создать динамические нагрузки более 100 МПа с практически мгновенной скоростью нагружения. Под действием такой гидродинамической волны движение потока жидкости в продуктивном слое будет происходить уже не в статическом режиме, как в случае традиционного ГРП, а в импульсном. Мощность динамического удара жидкости на породу пласта будет на несколько порядков выше, чем при обычном ГРП. Это позволяет сделать предположение о возможности использования ГИЭ в процессах гидроразрыва пласта и рекомендовать провести целенаправленные эксперименты.

Преимущества, которые можно достичь, используя для гидроразрыва пласта ГИЭ, определяются отказом от использования мощных насосных агрегатов, в простоте конструкции ГИЭ и существенной экономии энергии.

**Заключение.** Разработаны технические решения конструктивных элементов и макет генератора гидроакустических волн высокой интенсивности, который успешно прошел стендовые испытания и доказал стабильность работы в условиях приближенных к промышленным. Проведены математические исследования его работы в скважинных условиях и теоретически показана возможность использования ГИЭ для решения вопросов повышения нефтеотдачи пластов. Выдвинуто предположение о возможности применения предлагаемого метода генерации волн для проведения ГРП.

Для подтверждения полученных теоретических результатов будут проведены натурные испытания.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии. М.: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2008. 712 с.
2. Лысенко Г.П., Котельников В.А., Украинский Л.Е. Глубоководный генератор ударных волн высокой интенсивности // Материалы международной конференции “Машины, технологии и материалы для современного машиностроения”. Сборник тезисов конференции. 2018. С. 103.
3. Димитров В.И. Простая кинетика. Новосибирск: Наука, 1982. 382 с.
4. Гельфанд Б.Е., Попов О.Е., Чайванов Б.Б. Водород: параметры горения и взрыва. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 288 с.
5. Warnatz J. Combustion Chemistry / W. C. Gardiner (Ed.). Berlin: Springer-Verlag, 1984.
6. Tien J.H., Stalker R.J. Release of chemical energy by combustion in a supersonic mixing layer of hydrogen and air // Combust. Flame. 2002. V. 131. № 3. P. 329.
7. Даутов Н.Г., Старик А.М. К вопросу о выборе кинетической схемы при описании детонации в смеси  $H_2$ +воздух за ударными волнами // Теплофизика высоких температур. 1993. Т. 31. № 2. С. 292.
8. Бедаев И.А., Федоров А.В. Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 1. С. 26.

9. Астахов Н.С., Николаев Ю.А., Ульяницкий В.Ю. О параметрах детонации водородно-кислородных и водородно-воздушных смесей при высокой начальной плотности // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. № 1. С. 98.
10. Гурвич А.М., Шаулов Ю.Х. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения. М.: МГУ, 1955. 165 с.
11. Попов О.Е., Когарко С.М. Сравнительная характеристика волн давления при подводных взрывах газообразных и конденсированных ВВ // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13. № 6. С. 926.
12. Когарко С.М., Попов О.Е., Новиков А.С. Подводный взрыв газовой смеси как источник волн давления в жидкости // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11. № 5. С. 759.
13. Топлива. Высшая теплотворная способность – таблица. (Удельная теплота сгорания). Высшая/низшая теплотворная способность – пояснения. <http://tehtab.ru/guide/guidephysics/guidephysicsheatandtemperature/comnustionenergy/fuelshighercaloricvalues>, 07.04.2020.
14. Обзор современных методов повышения нефтеотдачи пласта. <http://www.petros.ru/rus/news/?action=show&id=267>, 07.04.2020.
15. Физические методы. [https://studwood.ru/1274300/geografiya/fizicheskie\\_metody](https://studwood.ru/1274300/geografiya/fizicheskie_metody), 07.04.2020.
16. Гидравлический разрыв пласта: виды, расчет и технологический процесс. <https://fb.ru/article/459390/gidravlicheskiy-razryiv-plasta-vidyi-raschet-i-tehnologicheskij-protsess>, 07.04.2020.
17. Способ интенсификации добычи нефти и газа путем гидроразрыва продуктивного нефтегазонасного пласта / Акционерное общество открытого типа “Ноябрьскнефтегазгеология”, РФ Патент 2069743С1, МПК E21B 43/116, 1996.11.27.
18. Расчет давления гидроразрыва пласта. <https://megalektsii.ru/s27358t4.html>, 07.04.2020.
19. Расчет гидравлического разрыва пласта. [https://studwood.ru/1001342/tovarovedenie/raschyot\\_gidravlicheskogo\\_razryva\\_plasta](https://studwood.ru/1001342/tovarovedenie/raschyot_gidravlicheskogo_razryva_plasta), 07.04.2020.
20. Проектирование гидроразрыва пласта в терригенных коллекторах. Оценка эффективности. СТО Газпром 2-2.3-635-2012. М.: ОАО “ГАЗПРОМ”, 2012. 48 с.