

УДК 532

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА СТЕНКУ НЕФТЯНОЙ СКВАЖИНЫ, ФОРМИРУЕМОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ

Г. А. Барбашова, В. М. Косенков

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, 54018 Николаев, Украина

Исследованы гидродинамические процессы в разрядной камере устройства, предназначенного для увеличения проницаемости пористой среды в призабойной зоне нефтяной скважины. Определены пространственные и временные характеристики волн давления, возникающих в результате электрического разряда в жидкости. Исследовано влияние характеристик электроразрядного устройства и гидростатического давления в скважине на динамическую нагрузку, действующую на стенку скважины.

На основе математической модели исследуются гидродинамические процессы в камере электроразрядного устройства (ЭРУ), используемого для обработки нефтяных скважин с целью улучшения фильтрационных характеристик их призабойной зоны.

Схема разрядной камеры ЭРУ изображена на рис. 1 (1, 2 — электроды, 3 — полиэтиленовый электрический изолятор, 4 — “окно” устройства, 5 — стенка скважины, 6 — канал разряда, 7 — граница зазора между ЭРУ и стенкой скважины). Принцип действия ЭРУ заключается в следующем. В результате электрического разряда между электродами образуется заполненная плазмой полость (канал разряда), давление в которой может достигать 10^9 Па, что значительно превышает давление в окружающей жидкости [1].

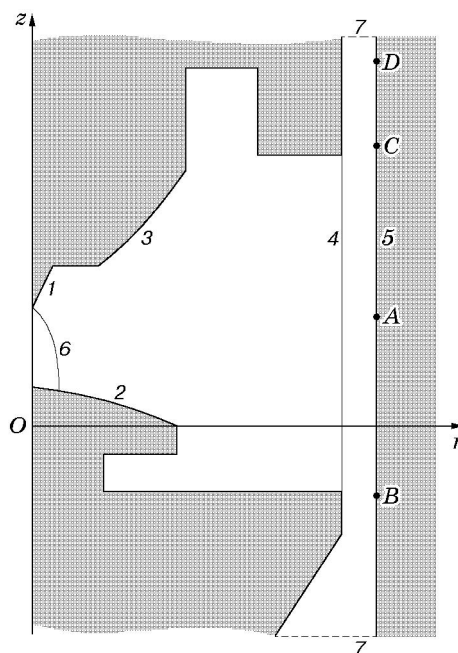


Рис. 1

Вследствие этого полость начинает расширяться. Образующаяся при этом волна сжатия и следующий за ней поток жидкости через “окно” устройства достигают стенки скважины. Действующая на стенку гидродинамическая нагрузка вызывает появление в призабойной зоне скважины радиальных трещин, увеличивающих проницаемость пласта, и относительное движение матрицы и жидкости, что способствует увеличению проницаемости матрицы [2]. Эффект воздействия гидродинамической нагрузки зависит от параметров волн давления. Поэтому основной целью проводимых исследований является определение гидродинамической нагрузки на стенку скважины.

При построении математической модели рассматриваемого процесса приняты следующие допущения: разрядная камера осесимметричная; ее стенки, как и стенки скважины, абсолютно жесткие; образовавшаяся при электрическом разряде полость в начальный момент имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна расстоянию между электродами, а ось симметрии совпадает с осью симметрии ЭРУ и скважины; стенка полости непроницаема; скважина заполнена идеальной сжимаемой жидкостью, а канал разряда — идеальной плазмой.

В соответствии с принятыми допущениями математическая постановка задачи состоит в следующем. В области, внутренней границей которой является контактный разрыв плазма — вода (стенка канала разряда), а внешней — неподвижная жесткая стенка (поверхности скважины и ЭРУ) и границы зазора между ЭРУ и стенкой скважины (рис. 1), необходимо решить систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики, записанных в цилиндрической системе координат и представляющих собой законы сохранения массы, импульса и энергии [3]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4,$$

$$F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T, \quad F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e + p)v_z]^T, \quad (1)$$

$$F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e + p)v_r]^T, \quad F_4 = [0, p, 0, 0]^T,$$

которая замыкается уравнением состояния в двучленной форме [3]

$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)]/[\rho(\varkappa - 1)]. \quad (2)$$

Здесь t — время; r, z — цилиндрические координаты; v_r, v_z — компоненты вектора скорости жидкости по осям Or, Oz соответственно; p — давление; ρ — плотность; $e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2]$; ε — удельная внутренняя энергия; $\varkappa = 7,15$; ρ_0, c_0 — плотность невозмущенной жидкости и скорость звука в ней.

На внутренней границе расчетной области задается давление, определяемое при решении уравнения баланса энергии в канале разряда [1]:

$$\frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(p_k V_k)}{dt} + p_k \frac{dV_k}{dt} = N(t), \quad (3)$$

где $\gamma = 1,26$; p_k, V_k — давление в канале разряда и его объем соответственно; $N(t)$ — скорость ввода энергии в канал разряда.

На неподвижной жесткой стенке ставится условие непротекания [3]

$$v_n = 0, \quad (4)$$

где v_n — нормальная составляющая вектора скорости жидкости.

На границах зазора между ЭРУ и стенкой скважины давление жидкости принимается равным гидростатическому давлению в скважине: $p = p_r$. Границы зазора расположены на таком расстоянии, чтобы волны давления от канала разряда не достигали их в рассматриваемый период времени (аналог бесконечно удаленной границы).

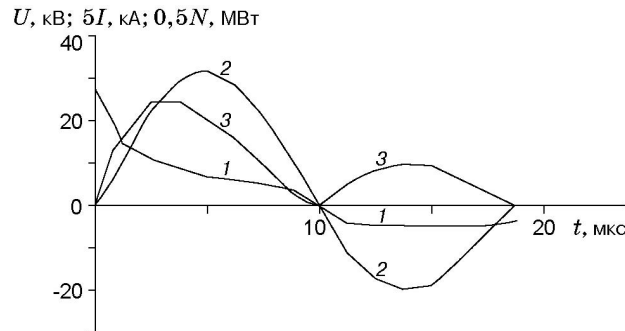


Рис. 2

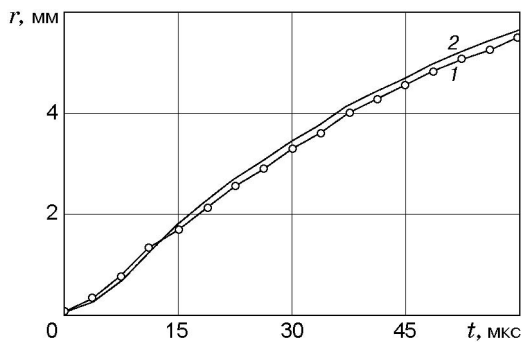


Рис. 3

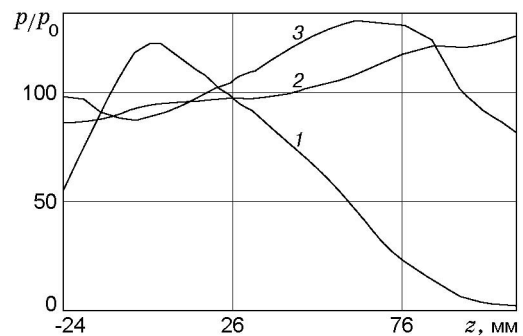


Рис. 4

Сформулируем начальные условия: значения гидродинамических характеристик соответствуют невозмущенному состоянию жидкости; скорость расширения канала равна нулю, его радиус равен 0,1 мм; давление в канале разряда превышает давление в окружающей жидкости на 1 МПа.

Система уравнений (1), (2) решается конечно-разностным методом Годунова [3]. Используется подвижная расчетная сетка, при построении которой учитываются форма внутренней поверхности разрядной камеры и расширение канала разряда. Давление p_k определяется из уравнения (3) двухшаговым методом Эйлера. Объем канала разряда V_k и его производная по времени вычисляются по координатам поверхности канала и скорости его расширения, полученным при решении задачи о распаде произвольного разрыва [3] на контактной границе плазма — жидкость. Алгоритм решения внутренней задачи гидродинамики при электрическом разряде в воде приведен в работе [4].

Функция $N(t)$ в уравнении (3) определяется по формуле $N(t) = U(t)I(t)$, где $U(t)$, $I(t)$ — напряжение и ток в канале разряда. Функции $U(t)$, $I(t)$ получены из данных эксперимента в ЭРУ, схема разрядной камеры которого приведена на рис. 1. Начальное напряжение на конденсаторной батарее, имеющей емкость 2,4 мкФ, равно 30 кВ, индуктивность электрической цепи — 3 мкГн, расстояние между электродами — 0,025 м. Зависимости $U(t)$, $I(t)$, $N(t)$, полученные при гидростатическом давлении $p_r = 0,1$ МПа, приведены на рис. 2 (кривые 1–3 соответственно).

Адекватность приведенной математической модели реальному процессу проверялась сравнением экспериментальных и расчетных данных. На рис. 3 приведена зависимость радиуса канала разряда в экваториальной плоскости от времени, полученная экспериментально (кривая 1) и при решении задачи (1)–(4) (кривая 2).

Время прихода волны сжатия, образовавшейся при электрическом разряде, к различным участкам на стенке скважины и ее интенсивность определяются расстоянием от этих

участков до канала разряда и формой области, занимаемой жидкостью. Впервые фронт волны достигает стенки в плоскости срединного сечения канала разряда (точка A на рис. 1) [5]. Постепенно возмущение распространяется по всей поверхности. Неодновременный приход волны сжатия к различным участкам стенки скважины приводит к неравномерному распределению давления вдоль стенки в начальный период (период основного нагружения). С течением времени распределение давления вдоль стенки скважины становится более равномерным. Приведенные на рис. 4 кривые характеризуют это распределение в направлении от точки B к точке D (см. рис. 1) в моменты времени $t = 50, 100, 150$ мкс (кривые 1–3 соответственно).

Зависимость давления от времени в точках A, B, C, D (см. рис. 1) показана на рис. 5 (кривые 1–4 соответственно). На участке стенки скважины между точками C и D давление изменяется качественно одинаково, но скорость возрастания давления уменьшается при удалении от канала разряда.

Во всех точках на стенке скважины, расположенных вблизи “окна” ЭРУ, давление жидкости после достижения максимального значения, обусловленного приходом волны сжатия от канала разряда, может иметь дополнительные максимумы от отраженных от поверхности ЭРУ волн, однако они существенно меньше первого, поэтому гидродинамическая нагрузка на стенку скважины в наибольшей степени определяется первым импульсом давления. Изменение во времени давления на стенке скважины после достижения им наибольшего значения удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$p = p_{\max}[1 - s_m \sin(2\pi t/\tau_s)] \exp(-t/\tau_e), \quad (5)$$

где p_{\max} — максимальное давление на стенке скважины; период изменения синусоидальной составляющей τ_s , постоянная экспоненты τ_e и максимальное значение синусоидальной составляющей s_m — параметры аппроксимации.

Соотношение (5) удобно использовать, когда необходимо знать гидродинамическую нагрузку на стенку скважины в течение длительного промежутка времени, в частности при изучении процессов в призабойной зоне скважины [2].

Разрабатываемые нефтяные пласты могут располагаться на глубинах, достигающих 5 км. Гидростатическое давление в скважине может составлять 50 МПа. Поэтому при изучении гидродинамических процессов в скважине при электрическом разряде необходимо оценить влияние на них гидростатического давления. Результаты расчетов приведены на рис. 6, на котором показано изменение избыточного давления на стенке скважины в срединной плоскости канала разряда (точка A на рис. 1) при значениях $p_r = 0,1, 5, 10, 15$ МПа (кривые 1–4 соответственно). Эти результаты свидетельствуют о том, что повышение гидростатического давления приводит к уменьшению амплитуды и импульса избыточного давления на стенке скважины, как и во всем объеме жидкости. Уменьшаются также

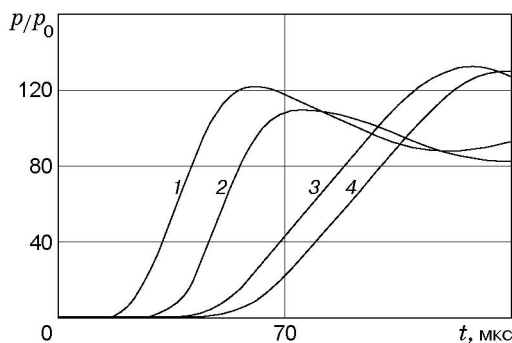


Рис. 5

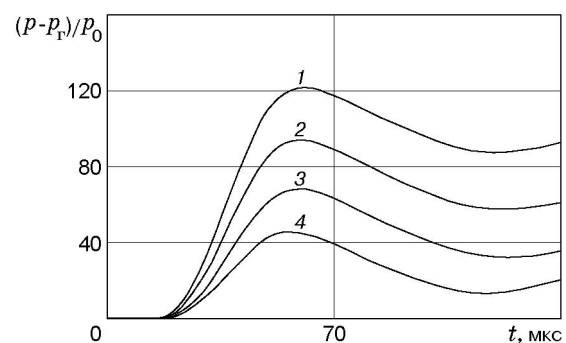


Рис. 6

скорость расширения канала разряда, его объем и период пульсаций, т. е. при увеличении глубины погружения ЭРУ уменьшается эффективность воздействия электрического разряда на призабойную зону скважины.

Авторы выражают благодарность В. Г. Жекулу и С. Г. Поклонову за предоставленные результаты экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Наугольных К. А., Рой Н. А.** Электрические разряды в воде. М.: Наука, 1971.
2. **Косенков В. М.** Фильтрация жидкости в многослойной пористой консолидированной среде под действием импульсной нагрузки // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / РАН. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1995. Вып. 110. С. 117–121.
3. **Численное** решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
4. **Барбашова Г. А., Иванов А. В., Каменская Л. А.** Исследование давления жидкости в жесткой камере при подводном искровом разряде // Гидромеханика. 1987. Вып. 56. С. 16–20.
5. **Барбашова Г. А., Иванов А. В.** Расчет двумерного нестационарного течения жидкости при подводном электрическом взрыве проволоочки конечной длины // Гидромеханика. 1986. Вып. 53. С. 16–19.

*Поступила в редакцию 16/VI 1999 г.,
в окончательном варианте — 27/VI 2001 г.*
