

ТЕСТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЯЗКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

А.П. Смирнов, В.Г. Жекул, С.Г. Поклонов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
пр. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина, iipt@iipt.com.ua*

Введение

В процессе эксплуатации водяных, нефтяных, а также нагнетательных скважин происходит снижение их производительности. Это может быть вызвано разного рода причинами. Одна из них – кольматирование порового пространства и перфорационных отверстий хрупкими и вязкими отложениями. Для очистки порового пространства от загрязнений применяются различные методы декольматации, одним из которых является электроразрядный (электрогидроимпульсный) способ, разработанный в Институте импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины (г. Николаев) [1].

Анализ проблемы

В ИИПТ НАН Украины проводились и продолжаются экспериментальные работы [2–4], а также работы с использованием математического моделирования [5–7] по исследованию электроразрядного воздействия на призабойную зону скважины. Из теоретических в первую очередь стоит отметить работы по исследованию электрических характеристик и динамики канала электрического разряда [5], рассмотрение гидродинамических процессов в скважине [6] и процессов в призабойной зоне [7] при электроразрядном воздействии с целью декольматации скважины от хрупких отложений. Для полноты охвата типов отложений авторами [8] рассматривались процессы, происходящие в перфорационных отверстиях скважины, заполненных вязкими отложениями и скважинной жидкостью при электроразрядном воздействии. Однако, как известно, при всех положительных качествах математического моделирования, таких, как относительно небольшие временные и материальные затраты, оно в свою очередь требует тщательной проверки соответствия математической модели реальным условиям, то есть проведения его тестирования.

В связи с этим **цель работы** – тестирование математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения в перфорационных отверстиях скважины.

Основная часть

Проверку (тестирование) математической модели можно осуществить несколькими способами. Сравнить результаты численного моделирования: с результатами, полученными другими авторами в ходе численного эксперимента; с экспериментальными данными других авторов; с данными, полученными в ходе специально поставленного эксперимента.

Авторы решили провести тестирование всеми предлагаемыми способами.

Математическая модель процесса электроразрядного воздействия на вязкие отложения в перфорационных отверстиях скважины

Математическая модель процесса электроразрядного воздействия на вязкие отложения в перфорационных отверстиях скважины ранее была опубликована в [8], здесь мы кратко напомним основные составляющие ее уравнения.

Модель состоит из трех блоков. Первый блок описывает процессы в канале разряда. Второй блок рассматривает процессы в скважинной жидкости от канала разряда до входной границы перфорационного отверстия. В третьем блоке исследуются процессы в перфорационных отверстиях скважины, заполненных вязкими отложениями и скважинной жидкостью.

Уравнения первого блока математической модели (1)–(4), которые соответствуют модели, приведенной в [9], описывают процессы в разрядном контуре и в канале разряда:

$$L \frac{dI}{dt} + I(R_K + R_{KH}) + q_3 / C = U_n, \quad (1)$$

где $I = dq_3 / dt$.

$$\frac{d(p_K S_K)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + p_K \frac{dS_K}{dt} = I^2 R_K \frac{1}{l}, \quad (2)$$

$$p_k = \frac{\rho_0}{2\pi} \frac{d^2 S_k}{dt^2} \ln \left(\frac{\pi^{0.5} l}{S_k^{0.5}} \right) - \frac{\rho_0}{8\pi S_k} \left(\frac{dS_k}{dt} \right)^2, \quad (3)$$

$$R_{KH} = \frac{Al(\gamma-1)}{p_k S_k}. \quad (4)$$

Здесь I – ток разряда, А; L – индуктивность электрической цепи, Гн; C – емкость конденсаторной батареи, Ф; U_n – напряжение к началу канальной стадии, В; R_k – сопротивление канала разряда, Ом; R_{KH} – сопротивление шин разрядного контура, Ом; q_3 – электрический заряд, Кл; l – длина канала разряда, м; p_k – давление в канале, Па; S_k – площадь поперечного сечения канала разряда, м²; γ – эффективный показатель адиабаты Пуассона; ρ_0 – плотность покоящейся жидкости, кг/м³; t – время, с; $A=10^5$ – искровая постоянная, В²·с·м⁻².

Для описания гидродинамических процессов в скважине используется одномерное волновое уравнение [10]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{1}{c_e^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (5)$$

где φ – потенциал скоростей движения жидкости, м²/с; r – пространственная координата, м; c_e – скорость звука в скважинной жидкости, м/с.

Гидродинамические процессы в перфорационном отверстии, которое заполнено вязкой жидкостью (третий блок математической модели), описываются системой уравнений (6)–(8) [11]. Замыкается система уравнением состояния в форме Тэтта (9):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0, \quad (6)$$

где $\text{div}(\rho V) = \frac{1}{r} \frac{\partial \rho V_r}{\partial r} + \frac{\partial \rho V_z}{\partial z}$; ρ – плотность жидкости, кг/м³; r, z – пространственные координаты, м; V_r – радиальная составляющая скорости жидкости, м/с; V_z – осевая составляющая скорости жидкости, м/с.

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} - \frac{V_r}{r^2} \right), \quad (7)$$

где ν – кинематический коэффициент вязкости, м²/с; P – давление в жидкости, Па.

$$\frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \quad (8)$$

$$P = B_c \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\kappa_c} - 1 \right) + P_0, \quad (9)$$

где P_0 – давление невозмущенной жидкости, Па; B_c, κ_c – параметры, характеризующие жидкую среду.

С учетом структуры данной математической модели и того, что выходные параметры одного блока являются входными параметрами другого, было принято решение выполнять тестирование по выходным данным каждого блока модели.

Тестирование первого блока математической модели

Тестирование первого блока математической модели, который описывает процессы в разрядном контуре и канале разряда, проводилось в два этапа.

На первом этапе было выполнено *сравнение расчетных и экспериментальных электрических характеристик, полученных в результате специально поставленного эксперимента*. Начальные параметры разрядного контура экспериментальной установки были следующими: напряжение зарядное $U_3=25$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C=1,93$ мкФ; длина межэлектродного промежутка $l_{МЭП}=0,024$ м; индуктивность электрической цепи $L=4,11$ мкГн; сопротивление шин разрядного контура $R_{ш}=0,163$ Ом. В ходе проведения экспериментов выполнялось осциллографирование разрядного тока и напряжения на разрядном промежутке с применением известной методики [13]. Типичная осциллограмма приведена на рис. 1. Результаты сравнения расчетных электрических характеристик с данными осциллографирования представлены на рис. 2.

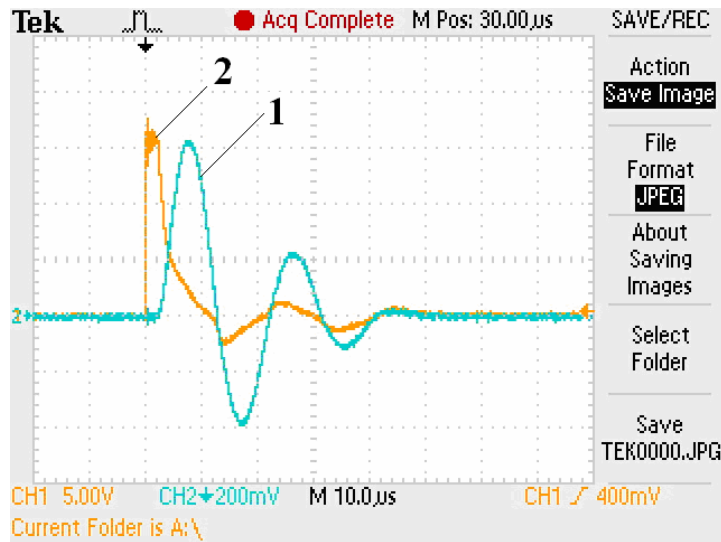


Рис. 1. Осциллограмма разрядного тока (1) и напряжения на разрядном промежутке (2) при электрическом разряде в жидкости

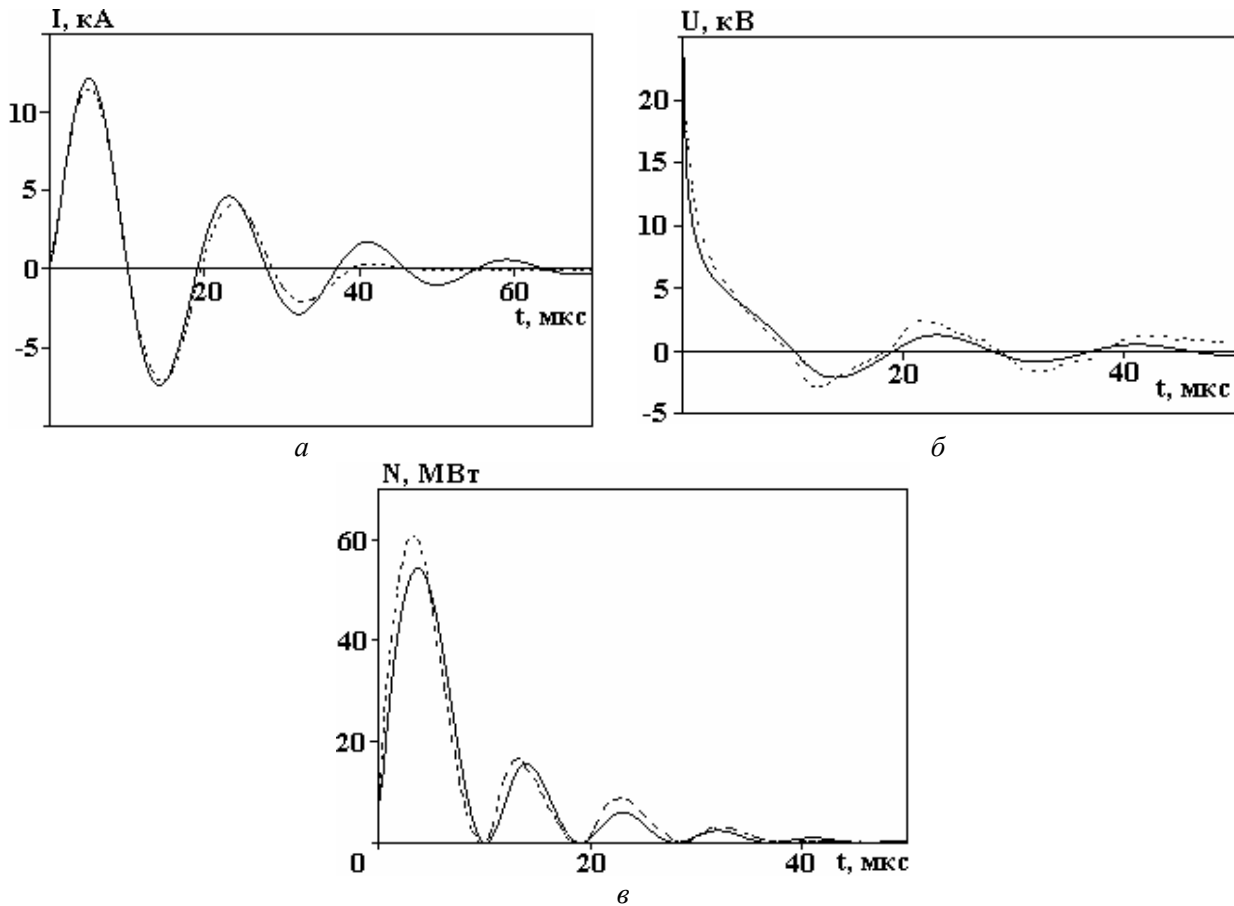


Рис. 2. Сравнение экспериментальных данных (штрихпунктирная кривая) и данных, полученных в ходе математического моделирования (сплошная кривая): а – разрядный ток; б – напряжение на искровом канале разряда; в – электрическая мощность, выделившаяся в канале разряда

Анализ рис. 2 показывает, что математическая модель удовлетворительно описывает электрические процессы в канале разряда: отклонение результатов расчета от экспериментальных данных в первый период выделения энергии, когда формируется волна давления, составляет менее 7% по току (рис. 2,а), менее 12% по напряжению (рис. 2,б) и менее 10% по мощности (рис. 2,в).

На втором этапе проводилось тестирование результатов, описывающих процессы в искровом канале разряда, использовались расчетные данные других математических моделей и экспериментальные данные других авторов [5, 12].

На рис. 3 представлены кривая 1 изменения давления в канале разряда в зависимости от времени (рассчитана с помощью математической модели, приведенной в данной работе) и кривая 2 (получена при применении подхода, описанного в работе [5]), при следующих начальных параметрах: напряжение зарядное $U_3=28,5$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C=1$ мкФ; длина межэлектродного промежутка $l_{МЭП}=0,04$ м; индуктивность электрической цепи $L=4$ мкГн.

Анализ рис. 3 показывает, что результаты двух математических моделей удовлетворительно согласуются между собой при описании давления в канале искрового разряда в период выделения основной доли энергии. В этот временной промежуток различие между двумя расчетными значениями максимальной величины давления в канале разряда составляет $\sim 7\%$.

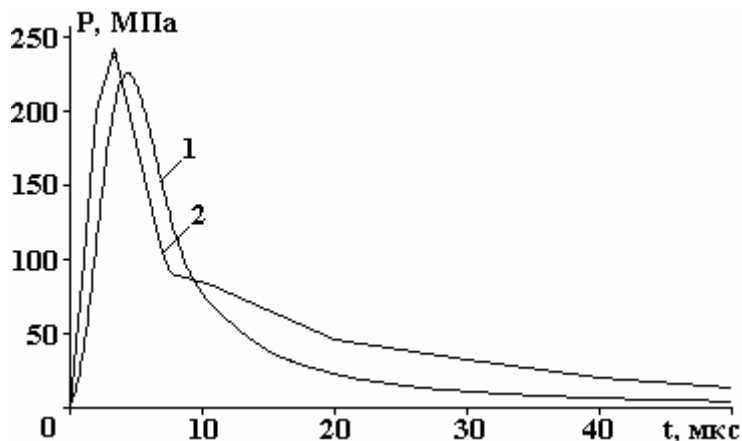


Рис. 3. Изменение давления в канале разряда в зависимости от времени: 1 – результаты расчета по математической модели, представленной в данной работе; 2 – результаты расчета, представленные на основании расчетов математической модели [5]

На рис. 4 представлены кривые изменения радиуса канала искрового разряда в зависимости от времени, рассчитанные с помощью математической модели, представленной в данной работе и построенной по экспериментальным данным [12], при следующих начальных параметрах: напряжение зарядное $U_3=20$ кВ; емкость конденсаторной батареи $C=6$ мкФ; длина межэлектродного промежутка $l_{МЭП}=0,045$ м; индуктивность электрической цепи $L=1,1$ мкГн.

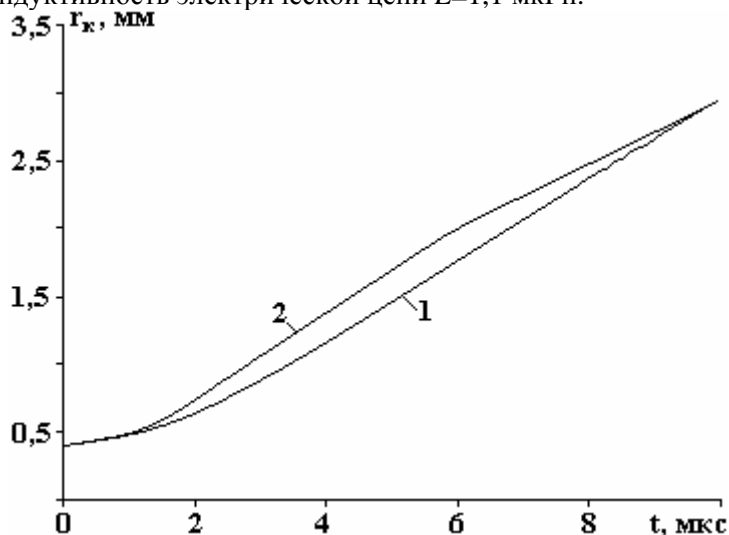


Рис. 4. Изменение радиуса канала разряда в зависимости от времени: 1 – результаты расчета по математической модели, представленной в данной работе; 2 – экспериментальные данные [12]

Анализ рис. 4 показывает, что результаты математического моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными на начальной стадии развития искрового канала разряда (различие экспериментальных и расчетных данных менее 20%), когда происходит формирование профиля давления канала разряда и выделяется основная часть энергии.

Тестирование второго блока математической модели

Результаты численного расчета второго блока математической модели, описывающего распространение волны давления в скважинной жидкости, тестировались сравнением данных матема-

тического моделирования с данными полуэмпирического метода расчета [14], отображающего аналитическую связь гидродинамических параметров разряда с электротехническими параметрами разрядного контура. С помощью полуэмпирического метода расчета были получены амплитуды волны давления на различных расстояниях от канала электрического разряда, которые потом сравнивались с аналогичными данными, полученными с помощью математической модели, приведенной в данной работе. Результаты сравнения для режима электрического разряда с параметрами $U_{п}=28,5$ кВ, $C=3,3$ мкФ, $l_{МЭП}=0,047$ м, $L=4$ мкГн приведены на рис. 5.

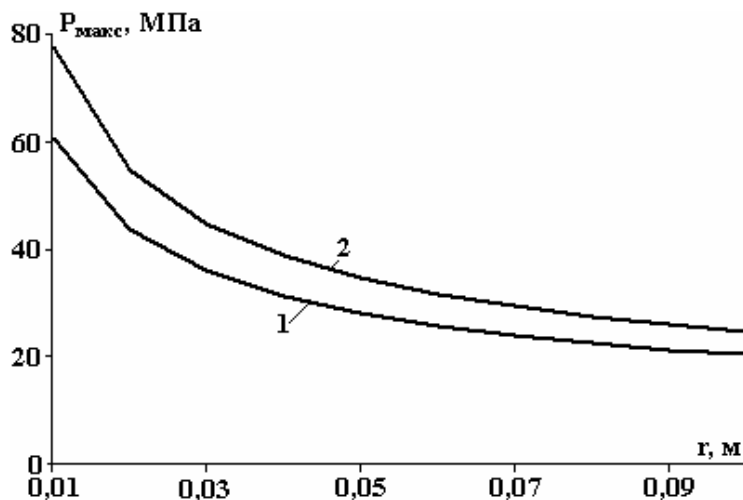


Рис. 5. Изменение амплитуды волны давления в жидкости по мере удаления от оси канала разряда: 1 – результаты расчета по математической модели, представленной в данной работе; 2 – результаты расчета по полуэмпирическому подходу [14]

Анализ рис. 5 показывает, что результаты численного моделирования и расчета по полуэмпирической методике удовлетворительно согласуются между собой, расхождение составляет $\sim 20\%$.

Тестирование третьего блока математической модели

Тестирование третьего блока математической модели (1)–(9), который описывает электроразрядное воздействие на вязкие отложения в перфорационных отверстиях скважины, осуществлялось сравнением расчетных данных с данными специально поставленного физического эксперимента на модели обсадной колонны с перфорационными отверстиями. Подобные данные в литературе отсутствуют.

Схема эксперимента на модели обсадной колонны с перфорационными отверстиями представлена на рис. 6. Моделью обсадной колонны служила стальная труба 1 с отверстиями. В отверстия на резьбовом соединении вставлены стальные трубки 2, они моделировали перфорационные отверстия скважины. Предварительно трубки полностью заполнялись солидолом, который моделировал вязкий кольматант. Модель опускалась в стальной бак 4, заполненный рабочей жидкостью 6 (водопроводная вода с удельной электропроводностью $\sigma_0=0,06$ См/м). Внутри модели помещалась электродная система 3, между ее электродами инициировался канал электрического разряда 7.

При электроразрядном воздействии на модель перфорационного отверстия вязкое вещество приходит в движение, и при этом из трубки вытесняется его часть $V_{св}^{экс}$ (рис. 7,б). Величина $V_{св}^{экс}$ (объем внутри трубки, освободившийся от вязких отложений) была принята в качестве основного критерия оценки электроразрядного воздействия.

Параметры разрядного контура были выбраны идентичными параметрам некоторых технологических режимов электроразрядного устройства типа «Скиф» для обработки скважин. Начальные параметры каждой серии и полученные результаты приведены в таблице, где $\bar{V}_{св}^{экс}$ – средний объем вязких отложений, вытесненный из трубки в результате электроразрядного воздействия; $\delta_{всв}$ – среднее квадратическое отклонение.

Для исследования поведения вязких отложений было выполнено две серии экспериментов.

В первой серии экспериментов проведено 20 опытов. Электрический разряд инициировали микропроводником. В пространство между каналом электрического разряда и объектом воздействия вводился акустически прозрачный, гидродинамически непроницаемый экран из полиэтилена. Во вто-

рой серии экспериментов выполнено 10 опытов. Разряд осуществлялся самопробоем. Акустически прозрачный экран отсутствовал.

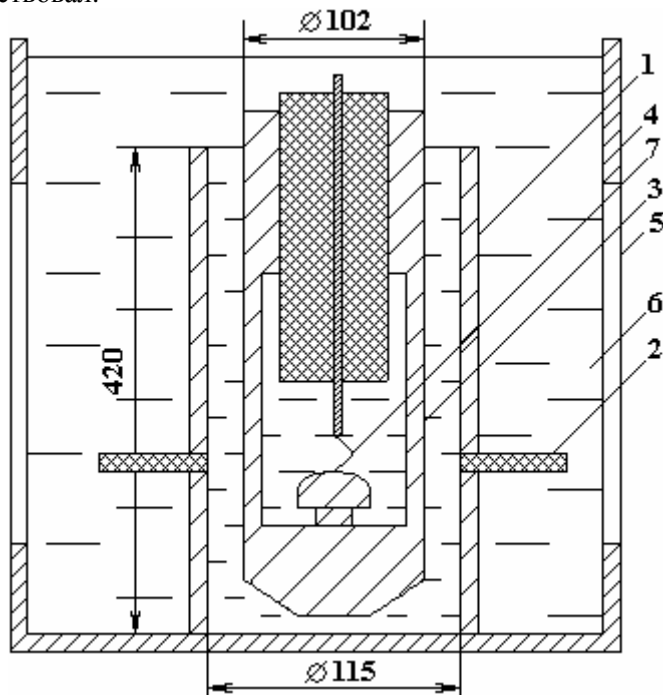


Рис. 6. Схема эксперимента на модели обсадной колонны с перфорационными отверстиями: 1 – стальная труба – модель обсадной колонны; 2 – стальная трубка – модель перфорационного отверстия, – заполненная вязкой средой, моделирующая вязкие отложения; 3 – электродная система электроразрядного устройства типа «Скиф 100»; 4 – стальной бак; 5 – окна для наблюдения; 6 – рабочая жидкость; 7 – канал электрического разряда

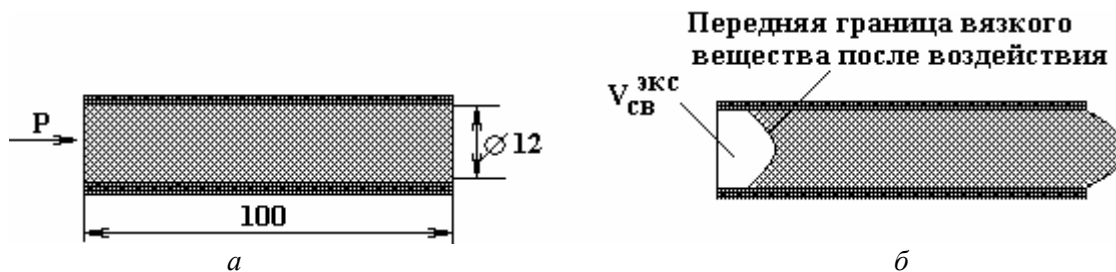


Рис. 7. Схема модели перфорационного отверстия скважины: а – до воздействия; б – после воздействия

В дальнейшем результаты математического моделирования сравнивались с результатами проведенного эксперимента. Начальные параметры математического моделирования соответствовали параметрам физической модели (см. таблицу). При этом значения коэффициента динамической вязкости солидола марки С были взяты из диапазона значений согласно [15]. Для каждой серии экспериментов было выполнено три расчета при $\mu = 80$; $\mu = 100$; $\mu = 150$ Па·с. Объем $\bar{V}_{св}^{экс}$, полученный в результате экспериментальных исследований, сравнивали с результатами математического моделирования.

Начальные данные и полученные результаты эксперимента по оценке электроразрядного воздействия на вязкие отложения

№	U_3 , кВ	С, мкФ	$l_{МЭП}$, м	$\bar{V}_{св}^{экс}$, м ³	$\delta_{V_{св}}$	
					м ³	%
1	30	2	0,04	$0,4565 \cdot 10^{-6}$	$0,08695 \cdot 10^{-6}$	19,0
2	25	2,4	0,032	$0,539 \cdot 10^{-6}$	$0,17387 \cdot 10^{-6}$	32,3

Для сравнения результатов расчета с данными, полученными экспериментальным путем, использовалось следующее выражение:

$$\Delta_{pэ} = \frac{\bar{V}_{св}^{экс} - V_{св}^{расч}}{\bar{V}_{св}^{экс}} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $V_{св}^{расч}$ – объем в трубке, освободившийся от вязких отложений при электроразрядном воздействии, полученный в результате математического моделирования, м³; $\Delta_{pэ}$ – отклонение расчетных данных от экспериментальных, %.

На рис. 8 представлены графики отклонения результатов расчета от данных, полученных экспериментальным путем, в зависимости от вязкости. Анализ рисунка показывает, что расчетные и экспериментальные данные отличаются в пределах от 30 до 60% в зависимости от принятой вязкости солидола. Причем отличие, при фиксированном значении вязкости, остается величиной постоянной независимо от режима электроразрядного воздействия. Это позволяет утверждать, что данная математическая модель удовлетворительно описывает поведение вязких отложений при электроразрядном воздействии на качественном уровне.

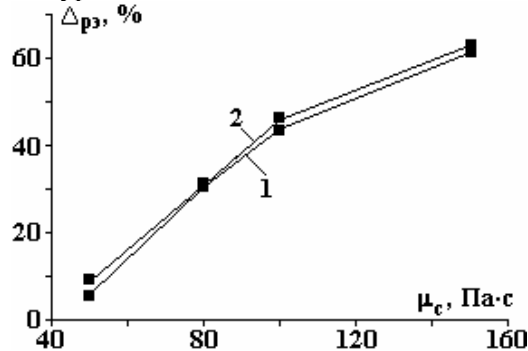


Рис. 8. Отклонение результатов расчета от экспериментальных данных в зависимости от вязкости, выбранной при расчете: 1 – серия экспериментов № 1; 2 – серия экспериментов № 2

Количественное несовпадение расчетных и экспериментальных данных в первую очередь вызвано отсутствием точных данных по вязкости использовавшегося в эксперименте солидола. Есть основания предполагать, что в действительности вязкость солидола была несколько меньше. Так, выполненный расчет при вязкости 50 Па·с дает расхождение результатов математического моделирования от экспериментальных данных ~ 10%.

Вторая, не менее важная причина состоит в том, что в расчете вязкость солидола принималась величиной постоянной, что не соответствует действительности. В реальности вязкость подобных веществ находится в зависимости от напряжения сдвига [16]. Качественный вид этих зависимостей известен. Однако для определения точной зависимости вязкости от напряжения сдвига каждого вещества требуются дополнительные специальные исследования.

Кроме того, в результате численного моделирования не учитывалось движение стенок модели обсадной трубы скважины.

Выводы

Тестирование математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения в цилиндрических каналах показало:

- удовлетворительное согласование *данных математического моделирования с результатами специально поставленного эксперимента* при описании электрических характеристик разряда (расхождение результатов расчета и эксперимента в первый период выделения энергии составляет менее 7% по току, менее 12% по напряжению и менее 10% по электрической мощности);

- удовлетворительное согласование *результатов математического моделирования с расчетными данными других авторов* [5] при описании давления в канале искрового разряда в период выделения основной доли энергии (различие между двумя расчетными значениями максимального значения давления в канале разряда ~ 7%);

- удовлетворительное согласование *результатов расчета с экспериментальными данными других авторов* [12] по описанию изменения радиуса канала разряда на начальной стадии, когда выделяется основная часть энергии (различие экспериментальных и расчетных данных – менее 20%);

- удовлетворительное согласование *результатов численного моделирования и расчета по полумпирической методике* [13] при описании распространения волны давления в скважине (расхождение – менее 20%);

- удовлетворительное качественное согласование *результатов математического моделирования с результатами специально поставленного эксперимента* при моделировании электроразрядного воздействия на вязкие отложения.

Результаты тестирования представленной математической модели свидетельствуют о том, что она может быть использована для описания процессов при электроразрядном способе декольматации и сравнения разных режимов электроразрядного воздействия по их влиянию на поведение вязких отложений в перфорационных отверстиях скважины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гулый Г.А. *Основы разрядноимпульсных технологий*. Киев: Наукова думка, 1990. 208 с.
2. Жекул В.Г., Поклонов С.Г., Трофимова Л.П., Швец И.С. Формирование электрического разряда в водонефтяных эмульсиях при высоких давлениях и температурах. *Электронная обработка материалов*. 2001, **37**(1), 37–42.
3. Поклонов С.Г., Жекул В.Г., Смирнов А.П. Методика и результаты экспериментальных исследований влияния упругой преграды на параметры волны давления при электрическом разряде в воде. *Электронная обработка материалов*. 2007, **43**(5), 56–60.
4. Сизоненко О.Н., Любимов А.Д., Денисюк О.Н. Влияние обводненности водонефтяной эмульсии на эффективность электрического разряда. *Нефтяное хозяйство*. 1996. (4), 51–52.
5. Жекул В.Г., Барбашова Г.А., Дубовенко К.В., Поклонов С.Г., Смирнов А.П. Электрические и гидродинамические характеристики разряда при импульсной обработке водяных скважин. *Вісник Національного технічного університету „Харківський політехнічний інститут»*. 2004, (35), 197–203.
6. Барбашова Г.А., Жекул В.Г., Косенков В.М., Софийский К.К., Смирнов А.П. Влияние оболочки камеры электроразрядного устройства на гидроимпульсную нагрузку в скважине. *Геотехнічна механіка*. 2004, (49), 106–114.
7. Косенков В.М., Курашко Ю.И., Швец И.С. Влияние параметров электроразрядного воздействия на динамические и фильтрационные процессы при фильтровой зоны водозаборных скважин. *Геотехнічна механіка*. 2002, (35), 23–31.
8. Smirnov A.P., Kosenkov V.M., Zhekul V.G. and Poklonov S.G. The study of the effect of the electrodischarge action modes on viscous deposits in cylindrical channels. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010, **46**(3), 237–242.
9. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 208 с.
10. Лепендин Л.Ф. *Акустика*. М.: Высшая школа, 1978. 448 с.
11. Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. М.: Наука, 1987. 840 с.
12. Швец И.С. К определению удельной электропроводности плазмы подводного искрового разряда. *Теплофизика высоких температур*. 1980, (1), 108–114.
13. Шваб А. *Измерения на высоком напряжении*. М.: Энергоатомиздат, 1983. 264 с.
14. Шамко В.В., Кучеренко В.В. *Теоретические основы инженерных расчетов энергетических и гидродинамических параметров подводного искрового разряда*. Препринт №20, ИИПТ НАН Украины, Николаев, 1991. 52 с.
15. Сеницын В.В. *Пластичные смазки в СССР. Ассортимент: Справочник*. М.: Химия, 1979. 272 с.
16. Ельцов С.В., Водолазная Н.А. *Физическая и коллоидная химия*. Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, 2005, 242 с.

Поступила 19.07.10

Summary

In work results of testing of mathematical model of electrodischarge influence on viscous sediment are resulted. It is shown, that she can be used for the description of processes in a discharge contour, the spark channel of the discharge and hydrodynamical processes in a well and perforated apertures at an electrodischarge method bed stimulation.
