

К.К. Софийский, д-р техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)
А.П. Смирнов,
В.Г. Жекул, канд. техн. наук,
С. Г. Поклонов, канд. техн. наук,
(ИИПТ НАН Украины),

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВЯЗКИЕ ОТЛОЖЕНИЯ

У роботі представлено методику експериментального тестування математичної моделі електророзрядного впливу на грузлі відкладення. Отримані результати показали, що дана математична модель може бути застосована для дослідження процесів у відкритих отворах призабойної зони при електророзрядній обробці свердловини

EXPERIMENTAL TESTING OF MATHEMATICAL MODEL OF ELECTRODISCHARGE INFLUENCE FOR VISCOUS MEASURE

In work the technique experimental testing of mathematical model of electrodischarge influence for viscous adjournment is submitted. The received results have shown, that the given mathematical model can be applied for research of processes in bottomhole zone at electrodischarge treatment a well

Введение. При эксплуатации нефтяных скважин происходит кольматирование порового пространства и перфорационных отверстий отложениями, что негативно сказывается на дебите скважины. Для очистки порового пространства от загрязнений применяются методы декольматации, одним из которых является электроразрядный (электрогидроимпульсный) способ, разработанный в ИИПТ НАН Украины (г. Николаев) [1].

Выполненные ранее теоретические работы [2, 3], направленные на исследование закономерностей электроразрядного воздействия на призабойную зону (ПЗ) скважины, при этом не затрагивали исследование поведения вязких отложений в полостях ПЗ скважины.

Для исследование поведения вязкого кольматанта, загрязняющего поровое пространство ПЗ скважины и перфорационные отверстия, при электроразрядном воздействии может быть применено математическое или физическое моделирование. Физическое моделирование процессов в скважинах требует значительных трудовых и материальных затрат, поэтому целесообразно применение математического моделирования. Однако данный подход требует проверки соответствия разработанной математической модели реальным условиям. Проверку можно осуществить, выполнив численный расчет ряда тестовых задач и сравнивая полученные результаты с литературными данными, или сравнить расчетные данные с данными, полученными в ходе специально разработанного и поставленного эксперимента.

Целью данной работы являлся выбор математической модели импульсного электроразрядного воздействия на вязкие отложения в ПЗ скважины, а также ее экспериментальное тестирование.

Основная часть. Математическая модель процесса. Алгоритм математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения можно условно разбить на три блока первый блок описывает процессы в канале разряда; второй блок описывает процессы в скважине; третий блок описывает процессы в вязкой жидкости. Третий блок данной математической модели может быть применен при рассмотрении гидродинамических процессов в поровом пространстве ПЗ, в различных трубопроводах, трубах загрязненных вязкими отложениями.

Входными параметрами первого блока математической модели выступают параметры разрядного контура, выходной параметр – давление в канале разряда, которое является входным параметром для второго блока математической модели. Выходной параметр второго блока математической модели и, соответственно, входной параметр третьего блока – давление на стенке скважины.

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

- канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра, высота которого равна длине межэлектродного промежутка, а ось симметрии совпадает с осью симметрии скважины и ЭРУ;
- скважина заполнена идеальной жидкостью;
- стенка скважины абсолютно жесткая и неподвижная;
- на стенку скважины падает плоская волна давления;
- стенки щели (поры) непроницаемые и неподвижные;
- пора призабойной зоны заполнена вязкой жидкостью с различными постоянными коэффициентами динамической вязкости и имеет цилиндрическую форму.

Процессы в канале разряда (первый блок) описываются уравнением баланса напряжений в разрядном контуре (1); уравнением баланса энергии (2); уравнением зависимости давления в канале разряда от его поперечного сечения (3) и уравнением (4), которое получено путем подстановки уравнения сопротивления канала в уравнение плазмы, представленным в [4].

$$L \frac{dI}{dt} + I(R_K + R_{\text{ш}}) + q/C = U_0, \quad (1)$$

где $I = dq/dt$.

$$\frac{d(P_K S)}{dt} \frac{1}{\gamma - 1} + P_K \frac{dS}{dt} = I^2 R_K \frac{1}{l_K}; \quad (2)$$

$$P_K = \frac{\rho_0}{2\pi} \frac{d^2 S}{dt^2} \ln \left(\frac{\pi^{0.5} l_K}{S^{0.5}} \right) - \frac{\rho_0}{8\pi S} \left(\frac{dS}{dt} \right)^2; \quad (3)$$

$$R_k = \frac{Al_k(\gamma - 1)}{P_k S} \quad (4)$$

В соотношениях (1) - (4):

I - ток разряда, А; L - индуктивность электрической цепи, Гн; C - емкость конденсаторной батареи, Ф; U_0 - напряжение к началу канальной стадии, В; $R_k, R_{ш}$ - сопротивление канала и шин разрядного контура, Ом; q - электрический заряд, Кл; l_k - длина канала разряда, м; P_k - давление в канале, Па; S_k - площадь поперечного сечения канала разряда, м²; γ - эффективный показатель адиабаты; ρ_0 - плотность покоящейся жидкости, кг/м³; A - искровая постоянная, В²·с·м⁻²; t - время, с.

Для описания гидродинамических процессов в скважине (второй блок), с учетом принятых допущений и геометрических параметров скважины, вполне достаточно будет использовать одномерное волновое уравнение в потенциалах скоростей, решение которого будет осуществляться в цилиндрических координатах (5)[5]:

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

где φ - потенциал скоростей движения жидкости, м²/с; r_c - пространственная координата, м; c_s - скорость звука в жидкости, м/с.

Третий блок математической модели описывает процессы в вязкой жидкости. Для этого используется система уравнений (6-9). В ее состав входит: уравнение неразрывности (6), уравнения движения жидкости (7,8) [6]; уравнение состояния жидкости в форме Тэтта (9).

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

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

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

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

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

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

где ρ_0 - плотность невозмущенной жидкости, кг/м³; P_0 – давление невозмущенной жидкости, Па; B, k – параметры, характеризующие данную среду.

Система уравнений, описывающая процессы в канале разряда (1-4), решается конечно-разностным методом Эйлера-Коши [7]. Волновое уравнение (5) решается с помощью схемы «явный крест» [8]. Для решения системы уравнений описывающих гидродинамические процессы в вязкой жидкости использовался трехшаговый конечно-разностный метод Эйлера-Коши-Абарбанеля и Цваса [9, 10].

Экспериментальное исследование влияния электрического разряда на вязкие отложения. Для экспериментального тестирования математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения в отверстиях ПЗ был выполнен ряд экспериментов. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

В качестве модели скважины выступала стальная труба, которая моделировала обсадную колонну, с просверленными в радиальной плоскости к электрическому разряду отверстиями. В отверстия на резьбовом соединении вставлены стальные трубки (рис.2), которые моделировали перфорационные отверстия скважины. Предварительно трубки полностью заполнялись солидолом, который выступал в качестве вязкого кольматанта.

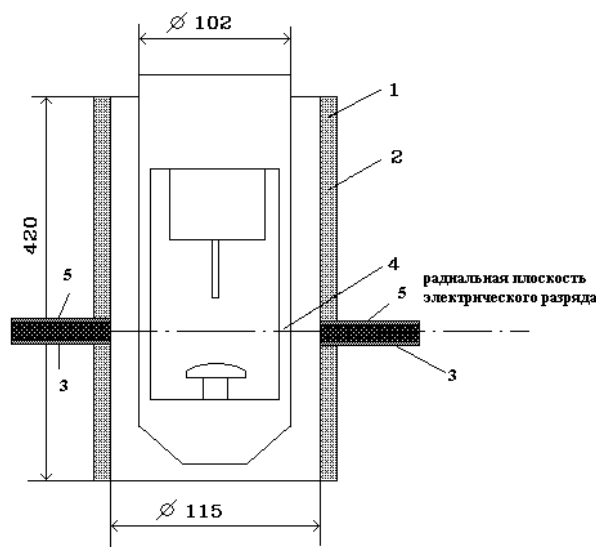


Рис. 1 – Схема экспериментального исследования влияния электрического разряда на вязкие отложения в модели перфорационного отверстия
1 - труба; 2 – отверстие; 3 – стальная трубка - модель поры; 4 – электродная система; 5 – вязкая среда, моделирующая вязкие отложения

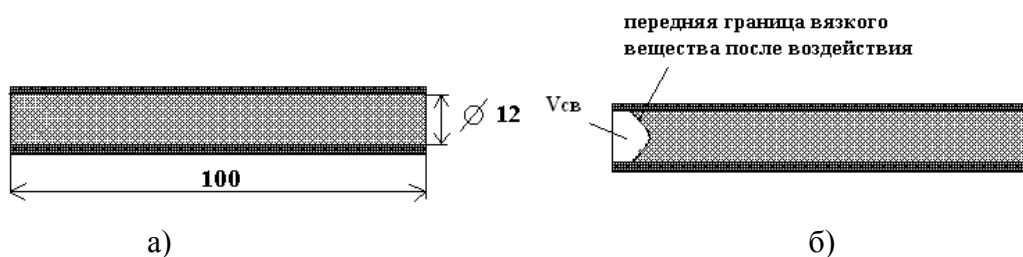


Рис. 2 – Схема модели перфорационного отверстия скважины
а) до воздействия; б) после воздействия

Модель помещалась в стальной бак, заполненный водопроводной водой с удельной электропроводностью $\sigma_0 = 0,06$ См/м. Внутри стальной трубы помещалась электродная система и осуществлялся электрический разряд.

Было выполнено две серии экспериментов. Параметры разрядного контура были выбраны идентичными параметрам электроразрядного устройства типа «Скиф» для электроразрядной обработки скважины. Начальные параметры каждой серии и полученные результаты приведены в таблице 1, где приняты следующие обозначения: $U_з$ – напряжение зарядное, кВ; $V_{св}^{экс}$ – среднее значение освобожденного объема, мл; C – емкость накопительного конденсатора экспериментальной электроразрядной установки; $l_{мэп}$ – длина межэлектродного промежутка, м.

В первой серии экспериментов было проведено 20 опытов. Электрический разряд инициировался микропроводником. В пространство между зоной инициирования электрического разряда и объектом воздействия был введен акустически прозрачный непроницаемый экран из полиэтилена. Во второй серии экспериментов было выполнено 10 опытов. Разряд осуществлялся самопробоем. Акустически прозрачный экран отсутствовал.

Таблица 1- Начальные данные и полученные результаты эксперимента по оценке электроразрядного воздействия на вязкие отложения.

№	$U_з$, кВ	C , мкФ	$l_{мэп}$, м	$V_{св}^{экс}$, м ³	Среднеквадратичное отклонение результатов, м ³
1	30	2	0,04	$0,4565 \cdot 10^{-6}$	$0,08695 \cdot 10^{-6}$
2	25	2,4	0,032	$0,539 \cdot 10^{-6}$	$0,17387 \cdot 10^{-6}$

Результаты сравнения данных расчета и эксперимента. Предварительные эксперименты показали, что при электроразрядном воздействии на модель перфорационного отверстия вязкое вещество приходит в движение и при этом в трубке освобождается некоторый объем $V_{св}$ (рисунок 2б), который был принят в качестве основного критерия оценки электроразрядного воздействия. Данные по $V_{св}$, полученные в результате экспериментальных исследований, сравнивались с данными освобожденного объема, полученными в результате численного расчета.

С использованием математической модели (уравнения 1-9) был выполнено моделирование электроразрядного воздействия на вязкие отложения в перфорационном отверстии. При этом значение коэффициента динамической вязко-

сти солидола были взяты из диапазона значений согласно [11]. Для каждой серии экспериментов было выполнено три расчетных режима: $\mu = 80$; $\mu = 100$; $\mu = 150$ Па·с.

Для сравнения расчетных данных с данными, полученными экспериментальным путем, использовалось выражение (10):

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

где $V_{св}^{расч}$ – расчетный освобожденный объем, м³; $\Delta_{pэ}$ – отклонение расчетных данных от экспериментальных, %.

На рисунке 3 представлены графики отклонения расчетных данных от данных, полученных экспериментальным путем, в зависимости от вязкости.

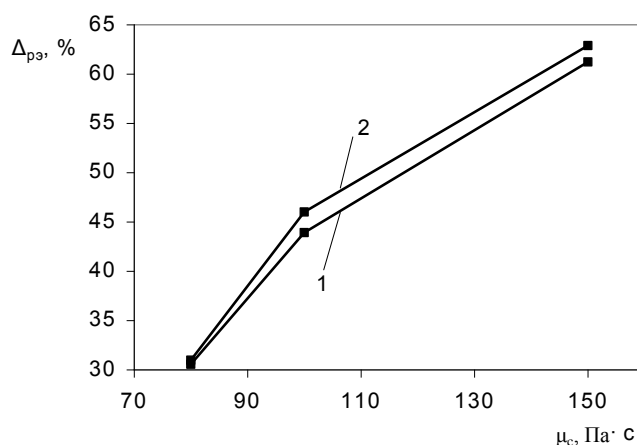


Рис. 3 – График отклонения расчетных данных от экспериментальных в зависимости от вязкости, выбранной при расчете
1 – экспериментальный режим №1; 2 – экспериментальный режим №2

Анализ рисунка 3 показывает, что как для режима №1 (характеризующегося наличием акустически прозрачного экрана), так и для режима №2 (с отсутствием экрана), сравнение расчетных и экспериментальных данных дало примерно одинаковое отклонение и составило от 30 до 60 % в зависимости от принятой вязкости солидола. Это позволяет говорить, что данная математическая модель хорошо описывает поведение вязких отложений при электроразрядном воздействии на качественном уровне.

Количественное несовпадение расчетных и экспериментальных данных, в первую очередь, вызвано отсутствием точных данных по вязкости использованного в эксперименте солидола при возникших в результате электроразрядного воздействия напряжений сдвига. Вторая, не менее важная причина, то, что в расчете вязкость солидола была принята величиной постоянной, а в реальности вязкость подобных веществ находится в зависимости от напряжения сдвига [12]. Качественный вид этих зависимостей известен. Однако для опреде-

ления точной зависимости вязкости от напряжения сдвига каждого вещества требуется проведение специального исследования.

Выводы. По результатам исследований, выполненных в данной работе, были сделаны следующие выводы:

- на основе уравнений Навье-Стокса составлена математическая модель поведения вязких отложений при электроразрядном воздействии;

- выполнено тестирование математической модели электроразрядного воздействия на вязкие отложения в отверстиях (щелях) ПЗ путем сравнения данных расчета и экспериментальных данных. Сравнение расчетных и экспериментальных данных дало примерно одинаковое отклонение на разных режимах воздействия и составило от 30 до 60 %;

- намечены пути усовершенствования математической модели за счет учета зависимости вязкости отложений от скорости сдвига вязкой среды, для определения которой необходимы дополнительные исследования;

- математическая модель электроразрядного воздействия на вязкие отложения в отверстиях ПЗ на данном этапе может быть применена для качественного исследования электроразрядного воздействия на вязкие отложения в отверстиях (щелях) ПЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гулый Г.А. Основы разрядноимпульсных технологий. - К.: Наукова думка, 1990. - 208 с.
2. Косенков В.М. Влияние параметров электроразрядного воздействия на динамические и фильтрационные процессы при фильтровой зоне водозаборных скважин/В.М. Косенков, Ю.И. Курашко, И.С. Швец// Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць: Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С.Полякова НАНУ. – Дніпропетровськ, 2002.-В.35.-С. 23-31.
3. Барбашова Г.А. Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии/Г.А. Барбашова, А.И. Вовченко, Л.А. Каменская, В.В. Шамко // Акуст. вісн. — 2004. — Т. 7, N 4. — С. 3-9.
4. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с.
5. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
6. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2-х т.: Т.2. – М.: Мир, 1991. – 552 с.
7. Демидович Б.П. Численные методы анализа/Б.П. Демидович, И.А. Марон, Э.З. Шувалова. - М.: Наука, 1967. – 368 с.
8. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978. – 512 с.
9. Смирнов А. П. Применение полунявного численного метода Эйлера-Коши-Абарбанеля и Цваса для решения нестационарных уравнений газовой динамики// Фізико-технічні проблеми гірничого виробництва. - Донецьк: Інститут фізики гірничих процесів НАН України, 2005. – С. 121-128.
10. Косенков В.М., Смирнов А.П. Влияние параметров численного метода Эйлера-Коши-Абарбанеля и Цваса на его дисперсионные свойства // Матеріали II Міжвузівської науково-практичної конференції „Науковий потенціал вищої школи”, Миколаїв, 27-28 квітня 2006 р. – Миколаїв: КП „Миколаївська обласна друкарня”, 2006 р. – С. 275-281.
11. Синицын В.В. Пластичные смазки в СССР. Ассортимент: Справочник. - М.: Химия, 1979. – 272 с.
12. Ельцов С.В. Физическая и коллоидная химия/ С.В. Ельцов, Н.А. Водолазная. – Харьков: Харьковский национальный университет имени В.Н.Каразина. – 2005 г. – 242 с.