

РАСЧЕТ ЭФФЕКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КИСЛОТНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ПЛАСТА

А. БИБОСИНОВ, Б. БЕКБАУОВ, М. ТУНГАТАРОВА
Казахский национальный университет имени аль-Фараби
e-mail: Bibossinov@yahoo.com

Введение

В данной работе изучено влияние технологии гидравлического разрыва пласта (ГРП) или кислотного гидроразрыва пласта (КГРП) на интенсификацию и повышение нефтеотдачи пластов. Сущность метода КГРП заключается в том, что на забое скважины путем закачки жидкости создается давление, превышающее горное, то есть вес вышележащих пород [1]. Порода продуктивного пласта разрывается по плоскостям минимальных напряжений горного давления и за счет продолжающейся закачки жидкости образовавшаяся трещина увеличивается в размерах. Далее кислота нагнетается в продуктивный пласт с искусственно созданной трещиной под давлением выше давления гидроразрыва пласта. Взаимодействуя с породой на поверхности трещины, кислота создает шероховатую поверхность внутри трещины. В результате, внутри трещины остаются взаимосвязанные щели конечных размеров после снятия избыточного давления.

Увеличение пористости и проницаемости породы в прискважинной зоне после проведения КГРП приводит к увеличению дебита и коэффициента извлечения. В качестве пропанта применяют жидкости разрыва на водной, углеводородной, пенной и реагентной (кислота, самораспадающийся гель) основе.

Исследования, проведенные по анализу воздействия кислотного гидроразрыва пласта, в основном можно поделить на 2 группы: исследования по развитию трещины под воздействием давления и проникновение кислоты в образованной трещине. В данной работе был проведен анализ, учитывающий как развитие трещины под воздействием давления, так и проникновение кислоты в образованной трещине.

1. Моделирование гидравлического разрыва пласта

Процесс создания трещины методом гидравлического разрыва описывается уравнениями сохранения массы, движения, зависимостью ширины трещины от давления, критерием распространения трещины и основными соотношениями, используемыми при моделировании распространения трещины [2, 3].

В начальное время объем трещины, полагается, равен нулю. В ходе создания трещины, объем закачиваемой жидкости, по закону сохранения будет равен объему трещины и объему жидкости, потерянной при просачивании через стенки трещины. Уравнение сохранения в дифференциальном виде, выраженное через значение расхода на единицу длины $q = vW$ имеет вид:

$$\bar{\nabla} \bar{q} + 2q_L + \frac{\partial W}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

где q_L – расход жидкости при фильтрации через единицу площади (скорость фильтрации).

В виду малой ширины трещины предполагается, что течение жидкости в трещине соответствует течению Пуазейля. Критерий образования трещины основан на принципе равенства коэффициента интенсивности напряжения K_I и трещиностойкости K_{IC} . Трещина будет распространяться в случае, если коэффициент интенсивности напряжения равняется трещиностойкости K_{IC} или критической интенсивности напряжения породы σ_{IC} .

Решение системы уравнений сохранения массы, течения Пуазейля и зависимости ширины трещины от давления, описывающих процесс образования трещины при гидравлическом разрыве пласта, определяет размер и распространение трещины.

В данной работе проводилось одномерное исследование образования трещины при гидравлическом разрыве пласта по модели KGD, в предположении, что высота трещины остается постоянной по всей длине трещины и все искомые величины (ширина трещины – w , распределение давления по трещине – p , средняя скорость жидкости разрыва в трещине – v_a) зависят только от одной переменной по пространству (по направлению распространения трещины) [4].

Уравнение зависимости ширины трещины от давления раскрытия приводится к виду

$$cw = p - \sigma_c \quad (2)$$

где c – коэффициент, учитывающий влияние упругости породы (выражается через модуль упругости E) [3, 5].

Из закона Пуазейля получено выражение для определения средней скорости потока в трещине. Из уравнения неразрывности определяются средняя скорость жидкости в трещине и скорость просачивания в пористую структуру, необходимые при дальнейшем решении задачи кислотного гидравлического разрыва. Эти параметры используются при определении длины проникновения кислоты по длине трещины и потери жидкости через стенки трещины.

По указанному методу составлено компьютерное приложение, описывающее процесс образования трещины путем закачки жидкости гидроразрыва. Для тестирования составленного модуля программного продукта использовались входные параметры, представленные в таблице 1.

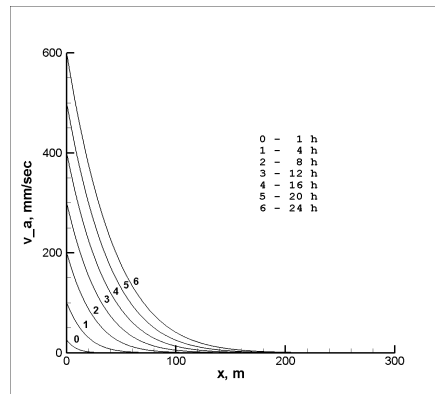
На основе построенной модели исследован процесс раскрытия трещины, получены функция зависимости ширины трещины от его длины и времени, изменение распределения давления вдоль трещины со временем. На рисунке 2 представлено изменение распределения средней скорости жидкости вдоль трещины. Видны увеличения скорости жидкости в прискважинной зоне, за счет увеличения ширины трещины в этой зоне. Это говорит о том, что жидкость больше течет по трещине, чем просачивается в пористую структуру.

Важной характеристикой пласта является модуль упругости, который выражает его геомеханические свойства. Чем больше модуль упругости, тем больше пласт оказывает сопротивление при раскрытии. Расчеты проведены для двух различных значений модуля упругости для анализа его влияния на раскрытие пласта гидравлическим разрывом.

Полученные результаты распространения трещины, изменение ее ширины со временем, относительное давление в трещине, средние скорости жидкости гидроразрыва, скорость просачивания жидкости разрыва вдоль трещины для различных значений

Т а б л и ц а 1. Входные параметры для модуля программного продукта

Параметры	Обозначения, единицы измерения	Значения
Длина	L , м	300
Время	T , сек	24*60*60
Плотность жидкости гидроразрыва	ρ , кг·м ⁻³	1000.0
Вязкость жидкости гидроразрыва	μ , кг·м ⁻¹ ·сек ⁻¹	2*0.00115
Модуль упругости	E , Па	3e+7
Объемный источник	Q , м ³ сек ⁻¹	0.055
Критическое напряжение	σ_c , Па	2e+6
Модуль упругости	E , Па	I вариант: 1e+8 II вариант: 2e+8

Рис. 1. Средняя скорость жидкости гидроразрыва в трещине (v_a), мм/сек

модуля упругости: $E = 1e + 8$ Па и $E = 2e + 8$ Па. Полученные результаты показывают, что изменение модуля упругости влияет на величину раскрытия трещины, тем самым и на среднюю скорость течения в жидкости в трещине. Из результатов расчета видно, что в грунтах с более высоким модулем упругости проведение гидравлического разрыва пласта приводит к образованию трещин с меньшей шириной и соответственно с меньшей средней скоростью течения жидкости внутри трещины. Согласно закону Пуазейля средняя скорость жидкости вдоль трещины при фиксированном градиенте давления прямо пропорциональна квадрату ширины трещины. Малое различие в градиентах давления в двух расчетах говорит о том, что увеличение ширины трещины приводит к увеличению расхода жидкости по сечению трещины, что в свою очередь сопровождается повышением средней скорости течения. Таким образом, полученные результаты полностью соответствуют известным законам гидродинамики.

В дальнейшем модель совершенствуется для задачи кислотного гидравлического разрыва пласта с привлечением уравнения сохранения концентрации кислоты, с учетом конечной и бесконечной скоростей реакции на стенках трещины. Это дает возможность определить распределение кислоты и ее потери за счет просачивания жидкости в пористую структуру и реакции кислоты со стенкой трещины.

2. Математическая модель процесса кислотного гидравлического разрыва пласта

Длина проникновения кислотного раствора по длине трещины является одним из важнейших параметров в модели кислотного гидроразрыва, которая подлежит определению. Для вычисления длины эффективного проникновения кислотного раствора надо определить распределение концентрации по трещине, параметры реакции кислота/порода и интенсивность утечки жидкости сквозь поверхности трещины. При известном распределении скорости кислотного раствора по трещине, скорости реакции на поверхности трещины, а также интенсивности утечки жидкости через границы трещины, можно определить эффективное проникновение кислотного раствора по длине трещины, используя эти данные. Распределение концентрации кислоты определяется из уравнения переноса концентрации [6, 7].

Процессы, протекающие при КГРП, уравнением для сохранения массы кислотного раствора, переноса его и взаимодействия с поверхностью трещины. Следовательно, для уравнения концентрации граничным условием является поверхностная реакция кислоты со стенкой трещины.

Уравнение для концентрации кислоты получается из закона сохранения массы вещества и записывается в инвариантном виде в одномерной постановке следующим образом, при условии отсутствия кислоты в трещине в начальный момент и заданным значением трещины в начале.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v_a \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_e \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \alpha C, \quad (3)$$

где v_a – средняя скорость жидкости в трещине, D_e – эффективный коэффициент перемешивания, C_i – входная концентрация, α – коэффициент, учитывающий влияния реакции кислоты на стенках трещины, который является функцией от константы реакции, пористости, эффективного коэффициента перемешивания и ширины раскрытия трещины.

Проведен ряд расчетов для анализа эффективности проведения кислотного гидроразрыва пласта. Расчеты проведены для различных величин пористости пласта и константы реакции кислоты с пластом. Изначально определено влияние скорости реакции кислоты с пластом, в связи с чем проведена серия расчетов для различных величин скорости реакции. Данные, использованные в расчетах, приведены в таблице 2.

Проведены расчеты распределения концентрации в трещине (%) для различных значений константы реакции порода/кислота. Увеличение константы реакции кислотного раствора приводит к снижению содержания кислоты вдоль трещины. Результаты расчетов видно, что при скорости реакции $k = 1e - 4$ кислота не достигает конца трещины, что может привести к закрытию части трещины, не обработанной кислотой, при завершении процесса кислотного гидравлического пласта. В таком случае рекомендуется увеличить среднюю скорость раствора увеличением расхода закачиваемого раствора в скважину. Из результатов расчета можно предположить, что кислота с константой реакции $k = 5e - 5$ будет оптимальной, так как при этой величине константы скорости реакции кислота достигает конца трещины (Рис. 3). Концентрация кислоты вдоль трещины не является избыточной, что в свою очередь не приводит к излишним расходам на кислоту.

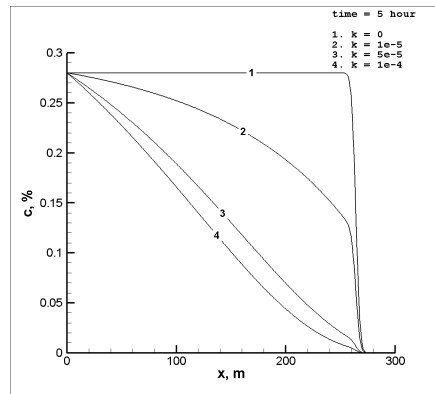


Рис. 2. Распределение концентрации кислоты в трещине (%), при $\phi = 0.2$ для различных скоростей реакции

Проведен ряд расчетов для различных величин пористости пласта при найденной величине скорости реакции. Из рисунка 4, где приведено распределение концентрации грунта для различных значений пористости видно, что пористость влияет на распределение концентрации в трещине, порода с большей пористостью имеют меньшую поверхность для реакции, что введет к уменьшению скорости реакции по длине трещины.

Т а б л и ц а 2. Расчетные данные для кислотного гидравлического разрыва пласта

Параметры	Обозначения, единицы измерения	Значения
Длина	L , м	300
Время закачки кислоты	T_2 , сек	5*60*60
Входная концентрация кислоты	C_i , %	28
Пористость	ϕ	I вариант: 0.1 II вариант: 0.2 III вариант: 0.3 IV вариант: 0.4
Эффективный коэффициент перемешивания	D_e , м ² /сек ⁻¹	1e-8
Константа реакции кислота/порода	k , м/сек	I вариант: 0.0 II вариант: 1e-5 III вариант: 5e-5 III вариант: 1e-4

Заключение

В результате данной работы проведено исследование эффективности проведения кислотного гидравлического разрыва пласта и определения показателей КГРП в зависимости от режимных параметров: геометрической структуры и эффективной проводимости пласта.

Полученные результаты показывают, что изменение модуля упругости влияет на величину раскрытия трещины, тем самым и на среднюю скорость течения в жидкости в

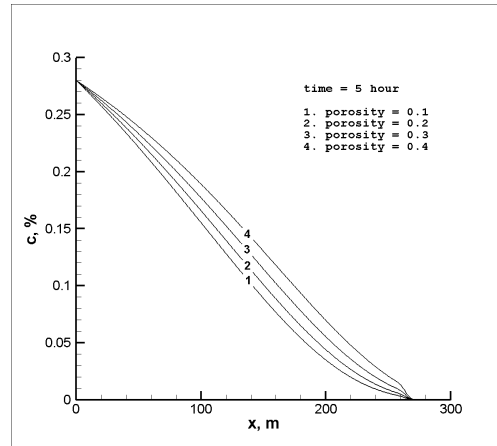


Рис. 3. Распределение концентрации в трещине (%) для различных величин пористости грунта, при $k = 5e - 5$

трещине. Из результатов расчета видно, что в грунтах с более высоким модулем упругости проведение гидравлического разрыва пласта приводит к образованию трещин с меньшей шириной и соответственно с меньшей средней скоростью течения жидкости внутри трещины.

Длина проникновения кислоты вдоль трещины зависит от скорости утечки жидкости в породу через поверхность трещины и от скорости реакции кислоты с горной породой. Скорость реакции кислоты с карбонатами, содержащимися в породе, достаточно быстрая, в связи с чем кислота расходуется до проникновения в вершину трещины. Более того, высокая скорость реакции приводит к утечке жидкости с созданием червоточин по трещине пласта. Поэтому, замедление скорости реакции кислоты с породой является одним из самых важных задач в проектировании режима КГРП в карбонатных пластах.

Список литературы

- [1] J. ADACHI, E. SIEBRITS, A. PEIRCE, J. DESROCHES International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44 (2007), P. 739–757.
- [2] GEERTSMA J, DE KLERK F. A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures. J Pet Tech 1969;21:1571–81 [SPE 2458].
- [3] ZHANG X, JEFFREY RG, THIERCELIN M. Deflection and propagation of fluid-driven fractures at frictional bedding interfaces: a numerical investigation, J Struct Geol 2007.
- [4] KHRISTIANOVIC SA, ZHELTOV YP. Formation of vertical fractures by means of highly viscous liquid. In: Proceedings of the fourth world petroleum congress, Rome, 1955. p. 579–86.
- [5] Пакет программ Meyer для моделирования гидроразрыва (MFrac). – Справочник пользователя. – Восьмое издание. - Meyer & Associates, Inc. - 2008.
- [6] SETTARI A. Modeling of Acid-Fracturing Treatments. SPE Production & Facilities, February 1993, Simtech Consulting Services Ltd.
- [7] LISEIKIN V.D. WILLIAMS B.B. AND NIERODE D.E. Design of Acid Fracturing Treatments, JPT (July 1972) 849-59; Trans., AIME, 253.