

WE BL 09

Simulation of unequal component natural stress field influence on VIKIZ and BKZ logs

G.V. Nesterova* (Trofimuk Inst. of Petroleum, Geology & Geophysics), I.N. Yeltsov (IPGG SB RAS), L.A. Nazarov (CIM SB RAS), L.A. Nazarova (CIM SB RAS) & I.V. Surodina (ICMMG SB RAS)

SUMMARY

Influence of unequal component natural stress field on water saturation, salt concentration, electrical resistivity and VIKIZ and BKZ logs are numerically simulated. 3D numerical models of mud filtration under stress-strain state and VIKIZ and BKZ logs developed by authors are used. Difference between lateral pressure factors in orthogonal direction have considerable impact on responses of certain probes of VIKIZ and BKZ tools. Probes of different length have another response. This fact can explain different reservoir estimation by interpretation of different borehole sounding methods as well as provide the groundwork for estimation of geomechanical rock properties.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕРАВНОКОМПОНЕНТНОГО ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ СКВАЖИНЫ НА ДИАГРАММЫ ВИКИЗ И БКЗ

Г. В. Нестерова (ИНГГ СО РАН), И.Н. Ельцов (ИНГГ СО РАН), Л.А. Назаров (ИГД СО РАН), Л.А. Назарова (ИГД СО РАН), И.В. Суродина (ИВММГ СО РАН)*

При бурении скважины нарушается естественное напряженно-деформированное состояние массива горных пород, существенно изменяются (по сравнению с невозмущенной частью коллектора) проницаемость и пористость прискважинной зоны. В случае неравнокомпонентного поля напряжений изменения пористости и проницаемости различны по разным азимутальным направлениям, что сказывается на процессе проникновения бурового раствора в пласт, эволюцию распределений водонасыщенности, солёности, удельного электрического сопротивления (УЭС). Целью данной работы является анализ изменения кривых зондирования ВИКИЗ и БКЗ в зависимости от соотношений коэффициентов бокового отпора при различных характеристиках пород пласта и заполняющего их флюида.

Увеличение глубины скважин, горизонтальное и наклонное бурение, неравнокомпонентное поле внешних напряжений [18] – вот далеко не полный перечень факторов, которые могут инициировать возникновение зон необратимого деформирования и разрушения в околоскважинном пространстве [10; 16]. В этих зонах существенно изменяются не только механические, но и фильтрационно-ёмкостные свойства породного массива. Лабораторные эксперименты показали, что на запредельной стадии деформирования проницаемость низкопористых пород (уголь, мрамор) резко увеличивается, а высокопористых пород-коллекторов уменьшается в несколько раз [12]. Эти обстоятельства необходимо учитывать при описании процессов массопереноса в прискважинной зоне при интерпретации данных ГИС.

Традиционные подходы к моделированию проникновения фильтрата бурового раствора в пласты-коллекторы в задачах интерпретации данных скважинной электрометрии не рассматривали необратимые деформации, возникающие в окрестности скважин при вскрытии пластов, находящихся, как правило, в негидростатическом поле внешних напряжений. В большинстве известных работ учет действующих в массиве горных пород напряжений сводится к формулировке согласованных с типом геодинамического режима граничных условий и введению линейной зависимости пористости от эффективного давления [13; 15-17]. Большинство современных расчетных схем реализуют блочно-модульные подходы, комбинирующие коды для моделирования проникновения бурового раствора в коллектор и напряженно-деформированного состояния, а также различные схемы согласования модулей (coupling), исполняемых независимо. В случае использования «полной модели» (full coupling), когда все неизвестные величины ищутся одновременно [8; 11], ввиду её чрезвычайной сложности и ресурсоёмкости часто используются различные упрощения.

Авторы данной работы создали компьютерную модель необратимого деформирования породного массива при бурении глубоких скважин, фильтрации двухфазной жидкости в пласте и солепереноса в околоскважинном пространстве. Эта модель использовалась для изучения влияния напряженно-деформированного состояния на показания приборов электрического и электромагнитного каротажного зондирования и интерпретации данных каротажа [1-2, 4-5]. Особое внимание уделено изучению влияния аксиальной неоднородности распределения проницаемости (возникающей в результате необратимого деформирования прискважинной зоны) на каротажные диаграммы прибора ВИКИЗ и БКЗ. Построены алгоритмы расчёта таких диаграмм для супермощных компьютеров с параллельными процессорами. Расчёты проводились в Сибирском Суперкомпьютерном Центре (<http://www2.sccc.ru/>). Имеющиеся вычислительные ресурсы позволяют проводить как совместное моделирование процессов, так и интерпретацию данных измерений, учитывающую более полное модельное описание среды, окружающей скважину.

Разработанная и численно реализованная авторами 3D модель для описания процесса проникновения бурового раствора в продуктивный пласт включает геомеханическую (поропластическая модель [9] с условием Треска или Кулона-Мора) и гидродинамическую (модель Бакли-Левверетта двухфазной фильтрации [3]) составляющие. В модели учитываются:

неравнокомпонентное поле внешних горизонтальных напряжений, характеризуемое коэффициентами бокового отпора q_x и q_y , по соответствующим осям декартовой системы координат (x, y, z) ;

эмпирическая зависимость проницаемости от напряжений $k = k(\sigma_1, \sigma_2)$, построенная на основе экспериментальных данных [12; 14] (σ_1 и σ_2 - главные напряжения, соответствующие осевому напряжению и боковому давлению при испытаниях по схеме Кармана);

динамика роста глинистой корки, скорость изменения толщины которой предполагалась пропорциональной объему проникшего в пласт бурового раствора.

Детальное описание среды, окружающей скважину, потребовало использования плотной расчётной сетки при численном моделировании теоретических каротажных кривых, а, значит и большого времени расчёта. Для ускорения расчётов была написана программа с использованием графического ускорителя Graphics Processing Unit (GPU), что привело к ускорению расчётов в среднем в 18-25 раз [6-7].

На рис. 1 показаны рассчитанные на основе критерия Треска при фиксированном значении коэффициента бокового отпора q_x и различных значений коэффициента q_y конфигурации зон необратимых деформаций в горизонтальном сечении скважины на глубине 3 км при следующих параметрах модели: пористость 25%, плотность породы 2500 кг/м³, прочность на сдвиг породы 12 МПа, проницаемость незатронутой проникновением части пласта 50 мД, плотность бурового раствора 1050 кг/м³, нефтенасыщенность -75 %, радиус скважины $r_0 = 0.1$ м, $q_x = 0.7$. Можно видеть, что при незначительной вариации величины q_y происходит переход от полного к частичному охвату контура скважины зоной разрушения. Это ведет к качественному изменению картины распределения удельного электрического сопротивления в околоскважинном пространстве: в случае неполного охвата имеет место аксиальная анизотропия - возникает низкоомная зона в направлении действия минимального горизонтального напряжения во внешнем поле, которой не наблюдается при полном охвате [2, 4].

На рис. 2-3 приведены результаты расчётов теоретических кривых зондирования ВИКИЗ (а) и БКЗ (б) для построенной электрогидродинамической модели прискважинной зоны. Значение коэффициента бокового отпора q_y является шифром кривых на рисунке. Видно, что значения и ВИКИЗ и БКЗ монотонно возрастают с увеличением q_y , но это происходит по-разному для разных методов и зондов. Показания короткого зонда (0.5 м) ВИКИЗ различаются значительно (1.5-3 раза), а длинный зонд ВИКИЗ (2 м) слабо реагирует на увеличение q_y . Максимальное расхождение показаний зондов БКЗ достигаются для зондов длиной 1 и 2 м. Такая разница в реакции зондов может быть одним из объяснений разных оценок пласта при интерпретации методов ВИКИЗ и БКЗ или основой для оценки анизотропии геомеханических свойств породы. Изменения показаний зондов сильно связаны с выбранной моделью зависимости проницаемости от напряжений. Рис. 2 соответствует уменьшению проницаемости вблизи скважины в два раза, рис. 3- в четыре. В последнем случае влияние неоднородности коэффициента бокового отпора существенно возрастает. Эти факторы нужно учитывать при интерпретации данных измерений в скважине.

Проведено моделирование процесса проникновения фильтрата бурового раствора в напряжённо-деформированный пласт с анизотропными свойствами породы и эволюции показаний зондов электрического и электромагнитного каротажа, связанной с этим процессом. Использование современных алгоритмов и мощных компьютеров позволило провести совместное моделирование нескольких физических процессов. Показано, что короткие гальванические зонды (БКЗ) слабо реагируют на неравнокомпонентность внешнего поля напряжений, в то же время показания короткого зонда электромагнитного метода (ВИКИЗ) могут различаться в два раза. Эта особенность должна обязательно учитываться при интерпретации данных каротажа в аксиально-неоднородных средах. Для оценки напряженного состояния предполагается использование априорной информации по данным сейсморазведки.

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН №89.

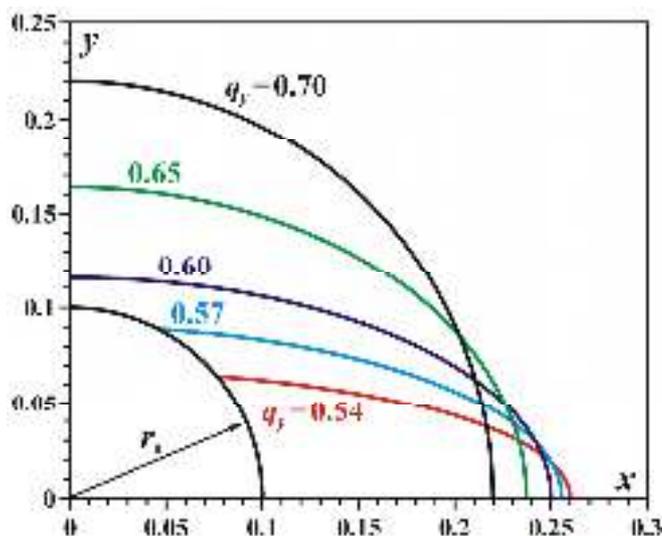


Рисунок 1 Конфигурация зон необратимых деформаций в окрестности скважины при различном соотношении компонент горизонтальных напряжений в естественном поле.

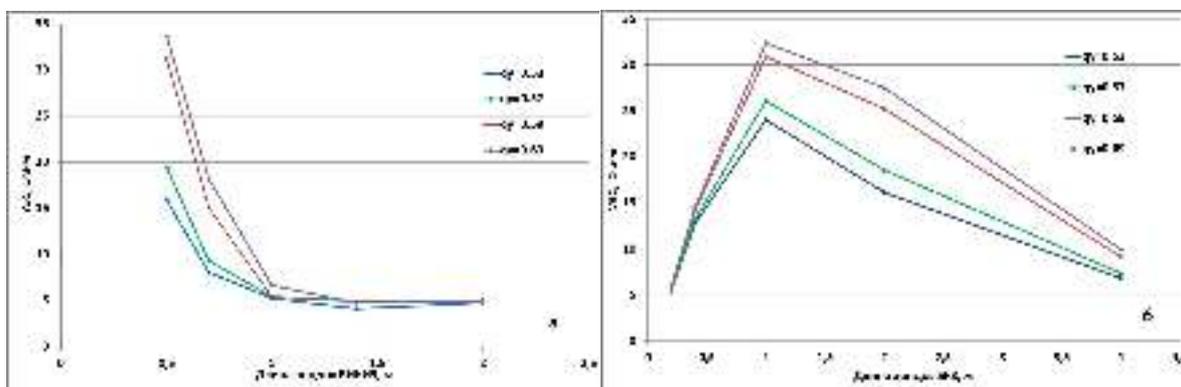


Рисунок 2 Синтетические кривые зондирования ВИКИЗ (а) и БКЗ (б) при уменьшении проницаемости в два раза. 48 часов после вскрытия пласта.

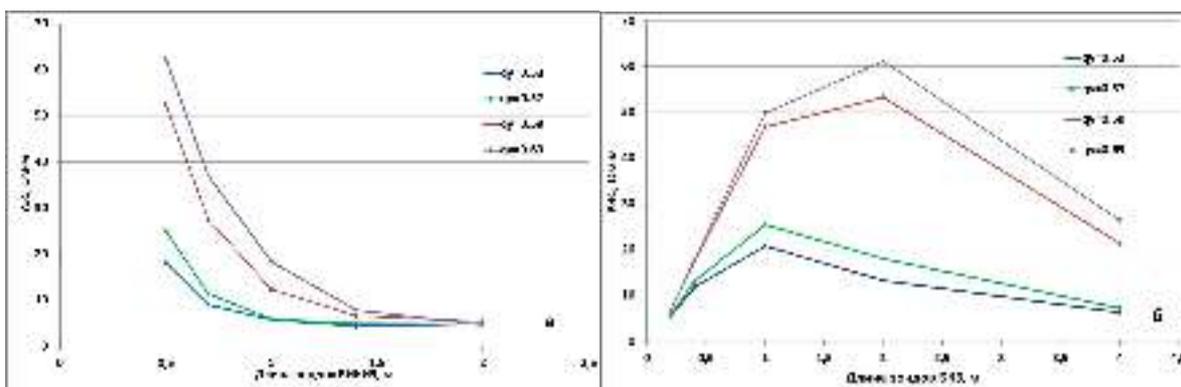


Рисунок 3 Синтетические кривые зондирования ВИКИЗ (а) и БКЗ (б) при уменьшении проницаемости в четыре раза. 48 часов после вскрытия пласта.

Литература

1. Ельцов, И.Н., Назаров, Л.А., Назарова, Л.А., Нестерова, Г.В., Эпов, М.И. [2012] Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессы в зоне проникновения. ДАН, 445(6), С. 671-674.

2. Ельцов, И.Н., Назарова, Л.А., Назаров, Л.А., Нестерова, Г.В., Соболев, А.Ю., Эпов, М.И. [2014] Скважинная геоэлектрика нефтегазовых пластов, разбураиваемых на репрессии давления в неравнокомпонентном поле напряжений. *Геология и геофизика*, **55**(5-6), С. 978-990.
3. Кашеваров, А.А., Ельцов, И.Н., Эпов, М.И. [2003] Гидродинамическая модель формирования зоны проникновения при бурении скважин. *ПМТФ*, **44**(6), С. 148-157.
4. Назарова, Л.А., Назарова, Л.А., Эпов, М.И., Ельцов, И.Н. [2013] Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин. *ФТПРПИ*, № 5, С. 37-49.
5. Нестерова, Г.В., Ельцов, И.Н., Назаров, Л.А., Назарова, Л.А. 2012[] Влияние геомеханических параметров на каротажные диаграммы ВИКИЗ и БКЗ и электрогидродинамическую модель околоскважинного пространства. *Тезисы XIV научно-практической конференции по проблемам комплексной интерпретации геолого-геофизических данных при геологическом моделировании месторождений углеводородов «ГЕОМОДЕЛЬ-2012»*, Геленджик, 10-14 сентября 2012, [электронный ресурс], 4 с.
6. Сурудина, И.В., Эпов, М.И. [2013] Моделирование диаграмм высокочастотного электромагнитного зондирования в скважинах с высокопроводящим раствором. *Каротажник*, № 5 (227), С. 60-75.
7. Сурудина, И.В., Нестерова, Г.В. [] Трёхмерное численное моделирование показаний зондов ВИКИЗ и БКЗ на графических процессорах. *Настоящий сборник*.
8. Chin, L.Y., Rajagopal Raghavan and Thomas, L.K. [2000] Fully coupled geomechanics and fluid-flow analysis of wells with stress-dependent permeability. *SPE Journal*, **5**(1), 32-45.
9. Coussy, O. [2004] *Poromechanics*. John Wiley & Sons, 298.
10. Fjær, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M. and Risnes, R. [2008] *Petroleum Related Rock Mechanics*. 2nd ed. Amsterdam, New York, Oxford, 491.
11. Garsia, J.G. and Tuefle, L.W. [2005] Numerical simulation of fully coupled fluid-flow/Geomechanical deformation in hydraulically fractured reservoirs. *SPE Production and Operations Symposium*, Oklahoma City, USA, 17-19 April 2005, 1-6.
12. Holt, R.M. [1990] Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field. *SPE Formation Evaluation*, **5**, 444-448.
13. Lautenschläger, C.E.R., Righetto, G.L., Inoue, N. and Barreto da Fontoura, S.A. [2013] Advances on partial coupling in reservoir simulation: A new scheme of hydromechanical coupling. *2013 North Africa Technical Conference & Exhibition*, Apr 15-17 2013, InterContinental Citystar, Cairo, Egypt, Conference Paper 164657-MS, 8.
14. Schutjens, P.M.T.M., Hanssen, T.H., Hettema, M.H.H., Merour, J., de Bree, P., Coremans, J.W.A. and Helliesen, G. [2004] Compaction-Induced Porosity/Permeability Reduction in Sandstone Reservoirs: Data and Model for Elasticity-Dominated Deformation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering - SPE RESERV EVAL ENG 01/2004*; 7(3):202-216. DOI:10.2118/88441-PA.
15. Settari, A. and Mourits, F.M. [1998] Coupled Reservoir and Geomechanical Simulation System A. *SPE Journal*, **3**(3), 219-226. SPE Paper 50939-PA.
16. Settari, A., Sen, V. [2007] The role of geomechanics in integrated reservoir modeling. *The Leading Edge*, **26**(5), 622-627. (DOI: 10.1190/1.2737102).
17. Thomas, L.K., Chin, L.Y., Pierson, R.G. and Sylte, J.E. [2003] Coupled Geomechanics and reservoir simulation. *SPE Journal*, **8**(12), 350-358.
18. Tuefel, L.W. and Mac Kinnon, R.J. [1982] Rock Mechanics: Key to Energy Production. *27th U.S. Symposium on Rock Mechanics, Chapter 98 In Situ Stress and Natural Fracture Distribution at Depth in the Piceance Basin*, Colorado: Implications to Stimulation and Production of Low Permeability Gas Reservoirs, SME.