

ВЛИЯНИЕ АНИЗОТРОПИИ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ДИАГРАММЫ ВИКИЗ И БКЗ ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Галина Владимировна Нестерова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории электромагнитных полей, тел. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.sbras.ru

Игорь Николаевич Ельцов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Коптюга, 3, доктор технических наук, доцент, зам. директора, тел. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.sbras.ru

Леонид Анатольевич Назаров

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. лабораторией горной информатики, тел. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Лариса Алексеевна Назарова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, доктор физико-математических наук, зав. отделом горного породоведения, тел. (383)217-05-28, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Ирина Владимировна Суродина

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории численного моделирования сейсмических полей, e-mail: sur@ommfao1.sccc.ru

В работе исследуется влияние анизотропии среды, окружающей скважину, на показания зондов ВИКИЗ и БКЗ. Используются разработанные авторами трёхмерные численные модели фильтрации бурового раствора в пласт в условиях изменения напряжённо-деформированного состояния среды и программы расчёта диаграмм ВИКИЗ и БКЗ для случая трёхмерного описания среды. Показано, что неравнокомпонентность поле внешних напряжений отражается в диаграммах скважинных измерений.

Ключевые слова: каротаж, численное моделирование, удельное электрическое сопротивление, коэффициент бокового отпора, напряжённо-деформированное состояние.

INFLUENCE OF THE GEOMECHANICAL PARAMETER ANISOTROPY ON VIKIZ AND BKZ LOGS ACCORDING TO THE DATA OF NUMERICAL SIMULATION

Galina V. Nesterova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Ph.D., senior scientist of Laboratory of electromagnetic fields, tel. (383)330-49-53, e-mail: NesterovaGV@ipgg.nsc.ru

Igor N. Yeltsov

Trofimuk Institute of petroleum geology and geophysics, Siberian branch of Russian Academy of Science, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Koptyug, Doctor of Science, associate professor, Deputy director on scientific work, tel. (383)333-34-32, e-mail: YeltsovIN@ipgg.nsc.ru

Leonid A. Nazarov

Chinackal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt, prof., Head of Rock Informatics Laboratory, tel. (383)217-24-46, e-mail: naz@misd.nsc.ru

Larisa A. Nazarova

Chinackal Institute of Mining, Siberian Branch of RAS, 630091, Russia, Novosibirsk, 54 Krasny Prospekt, prof., Head of Rock Properties Department, tel. (383)217-05-28, e-mail: larisa@misd.nsc.ru

Irina V. Surodina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6, Akademika Lavrentjeva, Ph.D., senior scientist of Laboratory of Numerical Modeling of Seismic Fields, e-mail: sur@ommafao1.sccc.ru

Influence of the anisotropy of the borehole environment on VIKIZ and BKZ logs are studied. 3D numerical models of mud filtration under stress-strain state and VIKIZ and BKZ logs developed by authors are used. It is shown that non-uniform compression affects the borehole logs.

Key words: logging, numerical simulation, resistivity, lateral pressure factor, stress-strain state.

При бурении и последующих работах на скважине изменяется напряжённо-деформированное состояние пород, её окружающих. При этом изменяются пористость и проницаемость вблизи скважины, причём связь этих параметров с напряжённо-деформированным состоянием может иметь различный характер для разных типов пород. Экспериментальные исследования зависимости проницаемости от напряжений при деформировании пород за пределом упругости показывают, что величина проницаемости может как увеличиваться [5, 11], так и уменьшаться [8-10] в несколько раз. Возрастание проницаемости имеет место, как правило, для пород с низкой пористостью. При изменении процесса проникновения фильтра бурового раствора в пласт, связанного с уменьшением/увеличением проницаемости и пористости изменяются распределения водонасыщенности и солёности пластового флюида и удельного электрического сопротивления (УЭС) породы в окрестности скважины. Это отражается в каротажных диаграммах ВИКИЗ и

БКЗ. Ранее был создан программно-алгоритмический комплекс, позволяющий моделировать процессы фильтрации двухфазной несмешивающейся жидкости в пласт и солепереноса в условиях напряжённо-деформированного состояния, имеющего место в процессе бурения скважины [2-4, 7]. Входными параметрами при моделировании являются фильтрационно-ёмкостные свойства пласта, свойства пластовых флюидов и бурового раствора, давление, геомеханические параметры (угол внутреннего трения, сцепление, коэффициент бокового отпора, предел прочности породы). Постановка задачи приведена в работах [3-4].

В настоящей работе исследуются случаи проникновения фильтрата бурового раствора в пласт, породы которого обладают отличными геомеханическими свойствами в разных направлениях.

Задача численного моделирования показаний зондов ВИКИЗ сводится к решению уравнений Максвелла

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{E} &= i\omega\mu\vec{H} \\ \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{\sigma}\vec{E} - i\omega\vec{\varepsilon}\vec{E} + \vec{J}^{cm} \end{aligned}$$

где $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ и $\vec{H} = (H_x, H_y, H_z)$ - векторы электрического и магнитного поля, ω - циклическая частота, \vec{j}^{cm} - плотность стороннего тока, текущего в генераторной катушке, $\mu = 4 * \pi * 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость, $\varepsilon(x, y, z)$ - диэлектрическая проницаемость и $\sigma(x, y, z)$ - электропроводность изотропной среды. Электрическое поле представим в виде суммы аномального \vec{E}^a и первичного \vec{E}^0 электрических полей. Последнее определяется как поле источника в однородной среде с электропроводностью σ_0 и нулевой диэлектрической проницаемостью. Аналогично представим и магнитное поле $\vec{H} = \vec{H}^0 + \vec{H}^a$. Для аномальных полей получим уравнения

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \vec{H}^a + \vec{E}^a (i\omega\vec{\varepsilon} - \vec{\sigma}) &= \vec{E}^0 (\vec{\sigma} - \sigma_0 - i\omega\vec{\varepsilon}) \\ \operatorname{rot} \vec{E}^a - i\omega\mu\vec{H}^a &= 0 \end{aligned}$$

Для сокращения размерности задачи перейдем к дифференциальным уравнениям в частных производных второго порядка:

$$\operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{E}^a + \vec{E}^a (i\omega\vec{\varepsilon} - \vec{\sigma}) \cdot i\omega\mu = \vec{E}^0 (\vec{\sigma} - \sigma_0 - i\omega\vec{\varepsilon}) \cdot i\omega\mu. \quad (1)$$

После дискретизации с помощью метода конечных разностей уравнения (1), полученную систему линейных уравнений решаем итерационным предобусловленным методом эрмитового разложения [6].

Численное моделирование показаний зондов БКЗ сводится к решению уравнения Пуассона для аномального потенциала электрического поля U^a

$$\operatorname{div}(\vec{\sigma}\nabla U^a) = -\operatorname{div}((\vec{\sigma} - \sigma_0)\nabla U^0), \quad (2)$$

где U^0 - первичный потенциал, связанный с источником поля, расположенным в однородной среде с проводимостью σ_0 , $\sigma(r, \varphi, z)$ - проводимость среды в цилиндрической системе координат, U - полный потенциал электрического поля $U = U^0 + U^a$. Дискретизация уравнения (2) проводится методом конечных разностей, полученная система линейных алгебраических уравнений решается итерационным предобусловленным методом сопряжённых градиентов [1].

На рис. 1 приведены кривые зондирования ВИКИЗ, а на рис. 2- кривые зондирования БКЗ, рассчитанные на НКС30-Т Сибирского Суперкомпьютерного Центра. Параметры пласта: глубина – 3000 км, пористость – 20%, проницаемость 50 мд, нефтенасыщенность – 75%, прочность пород коллектора на сдвиг – 12 Мпа, коэффициент бокового отпора в направлении y – 0.70. Значение коэффициента бокового отпора q_h в направлении x является шифром кривых на рисунке. Видно, что значения и ВИКИЗ и БКЗ монотонно возрастают с увеличением q_h .

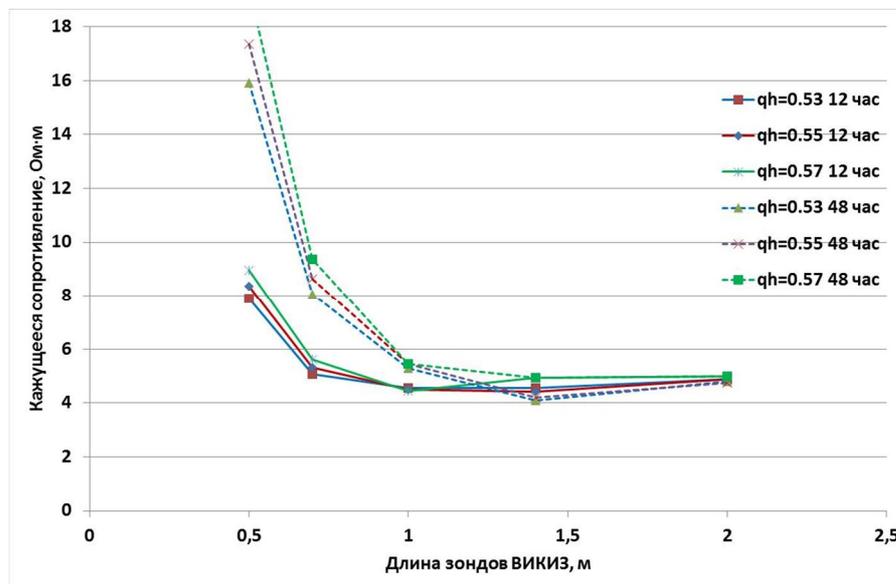


Рис. 1. Кривые зондирования ВИКИЗ для разных значений коэффициента бокового отпора q_h

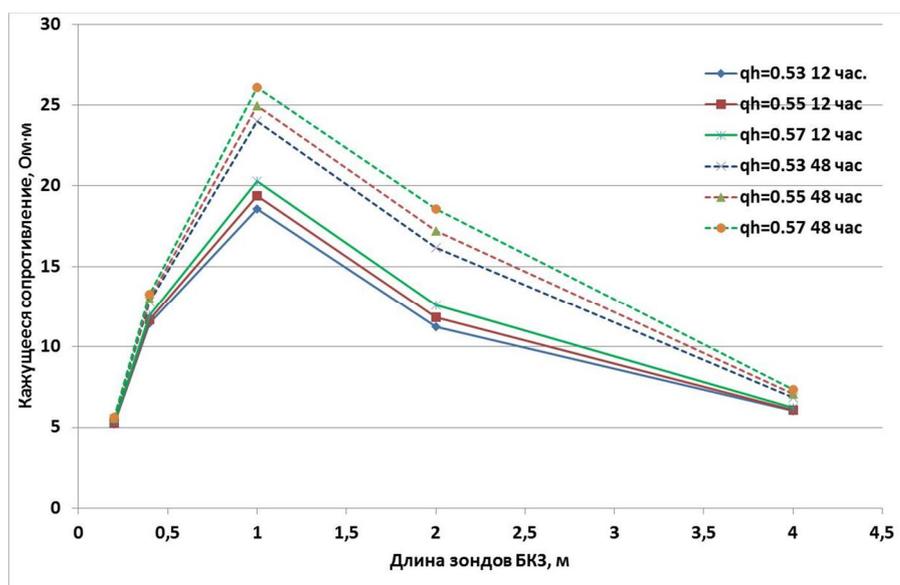


Рис. 2. Кривые зондирования БКЗ для разных значений коэффициента бокового отпора q_h

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 89 и гранта РФФИ 13-05-12031.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дашевский Ю.А., Сурудина И.В., Эпов М.И. Трёхмерное математическое моделирование системы мониторинга электрических свойств скважинного флюида // Международная конференция « Математические методы в геофизике», Новосибирск, 2003. - Ч.1, С. 268-272.
2. Ельцов И.Н., Нестерова Г.В., Кашеваров А.А. Петрофизическая интерпретация повторных электромагнитных зондирований в скважинах // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52. – № 6. – С. 852-861.
3. Ельцов И.Н., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Эпов М.И. Интерпретация геофизических измерений в скважинах с учетом гидродинамических и геомеханических процессов в зоне проникновения // ДАН. – 2012. – Т. 445. – № 6. – С. 671-674.
4. Назарова Л.А., Назарова Л.А., Эпов М.И., Ельцов И.Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. – 2013. – № 5. – С. 37-49.
5. Ставрогин А. Н., Тарасов Б. Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. СПб.: Наука, 2001.
6. Сурудина И.В., Мартаков С.В., Эпов М.И. Трёхмерное математическое моделирование гармонических электромагнитных полей в задачах каротажа в наклонно-горизонтальных скважинах // Международная конференция по вычислительной математике МКВМ-2004. Ч.2. – С.699-703.
7. Свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2012619496 РФ. GENM / Назаров Л.А., Назарова Л.А., Нестерова Г.В., Ельцов И.Н. Правообладатель: Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН. –№ 2012619496 от 19.10.2012.
8. Holt R.M. Permeability reduction induced by a nonhydrostatic stress field // SPE Formation Evaluation. – 1990. – No 5. – P. 444-448.
9. Keaney G. M. J., Meridith P. G., Murrel S. A. F. Laboratory study of permeability evolution in a “tight” sandstone under non-hydrostatic stress conditions // SPE /ISRM

EuRock'98. Trondheim: SPE. – 1998. – SPE/SRM 47265.
<http://www.onepetro.org/mslib/servlet/onepetropreview?id=00047265>

10. Randall M.S., Conway M., Salter G., Miller S. Pressure-Dependant Permeability in Shale Reservoirs Implications for Estimated Ultimate Recovery, AAPG Search and Discovery Article N 9012.2011, AAPG Hedberg Conference. – December 5-10. – 2010. – Austin, Texas.
http://www.searchanddiscovery.com/abstracts/pdf/2011/hedberg-texas/abstracts/ndx_miller.pdf

11. Rhett D. W., Teufel L. W. Effect of Reservoir Stress Path on Compressibility and Permeability of Sandstones//67th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineering, Washington, DC, October 1992. – SPE paper № 24756 1992. –P. 4-7.

© Г. В. Нестерова, И. Н. Ельцов, Л. А. Назаров, Л. А. Назарова, И. В. Суродина, 2014