

УДК 550.831

О ПЕРСПЕКТИВАХ РАЗВИТИЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

В.И. Костицын

Аннотация

Приведено теоретическое обоснование для определения плотности горных пород для различного искривления скважины и разных углов падения пластов. Показаны возможности гравиметрического каротажа в сравнении с результатами каротажа собственного потенциала и бокового каротажа, гамма-гамма каротажа и нейтронного каротажа на примере исследований геофизиков в Канаде и США.

Ключевые слова: гравиметрический каротаж, плотность горных пород, боковой каротаж, гамма-гамма каротаж, нейтронный каротаж.

Введение

Возможности гравиметрического каротажа определяются законом гравитации и не зависят от обсадки скважин, металлических обсадных труб, глинистой корки, качества цементирования колонны, промывочной жидкости [1–4]. По сравнению с определением плотности по керну гравиметрический каротаж позволяет изучить толщи, неблагоприятные в отношении выноса керна, и с одинаковой подробностью провести исследования всего геологического разреза [5–9].

В настоящей работе рассмотрим теоретическое обоснование гравиметрического каротажа по определению плотности горных пород с учетом искривления ствола скважины и разного угла падения пород. Приведем примеры проведения гравиметрического каротажа на основе исследований в Канаде и США.

Теоретическое обоснование

Для получения формулы для определения плотности горных пород будем исходить из следующего. При расположении скважинного гравиметра за пределами пласта горных пород возможно применение уравнения Лапласа

$$V_{xx} + V_{yy} + V_{zz} = 0,$$

а при нахождении внутри пласта – уравнения Пуассона

$$V_{xx} + V_{yy} + V_{zz} = -4\pi G\sigma,$$

где G – гравитационная постоянная, σ – плотность горных пород.

Тогда при шаге по скважине Δz значение силы тяжести обозначим в одной точке через

$$g_1 = 2\pi G\sigma\Delta z,$$

во второй точке через

$$g_2 = -2\pi G\sigma\Delta z,$$

разность $\Delta g = g_2 - g_1$ в развернутом виде будет

$$\Delta g = -4\pi G\sigma\Delta z.$$

Отсюда плотность пород определяется по формуле

$$\sigma = -\frac{1}{4\pi G} \cdot \frac{\Delta g}{\Delta z}.$$

При наблюдениях в скважине необходимо учитывать угол искривления ствола скважины α и угол падения пород β [3, 4]. Если пласты горизонтальны, а ствол скважины наклонен, то среднюю плотность пород предлагается вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{1}{4\pi Gh \cos \alpha} \left(g_1 - g_2 + \frac{\partial g}{\partial z} h \cos \alpha \right),$$

где h – расстояние между точками наблюдений 1 и 2.

Если же ствол шахты вертикален, а пласты наклонены, то

$$\sigma = \frac{1}{4\pi Gh \cos \beta} \left(g_1 - g_2 + \frac{\partial g}{\partial z} h \cos \beta \right).$$

Когда наклонный ствол шахты пересекает наклонно падающие пласты, то среднюю плотность следует вычислять по формуле

$$\sigma = \frac{1}{4\pi Gh \cos(\alpha \pm \beta)} \left(g_1 - g_2 + \frac{\partial g}{\partial z} h \cos \alpha \right).$$

Знак «плюс» относится к случаю, когда ствол скважины и пласты падают в одну и ту же сторону, а «минус» – когда они падают в разные стороны.

Практическое применение

Приведем примеры того, каким образом гравиметрический каротаж используют такие зарубежные геофизики, как Крис Нинд (компания Scintrex Ltd, Канада), Тим Ниебауер, Джеф Маккуин, Дерек Ван Веструм, Фред Клоппинг, Даниель Алиод, Этан Манн (компания Micro-g LaCoste Inc, США), Оливер Францис (Европейский центр геодинамических и сейсмологических исследований, Люксембург), для определения плотности горных пород совместно с результатами гамма-гамма каротажа [8–10]. В 2006 г. компанией Micro-g LaCoste были проведены гравиметрические измерения в трех скважинах, расположенных в Ханфорде (штат Вашингтон, США). Скважинные наблюдения проводились в скважинах через каждые 10 футов (3.05 м) с использованием скважинного гравиметра L&R. Полная длина участка, на котором в трех скважинах были получены каротажные данные, составляла 1280 м.

Точность скважинных гравиметрических измерений составляла 5 мкГал, при этом особое внимание уделялось правильному позиционированию гравиметрического датчика в каждой точке измерения. Скважинные гравиметрические данные, полученные с интервалами 10 м, позволили получить значения

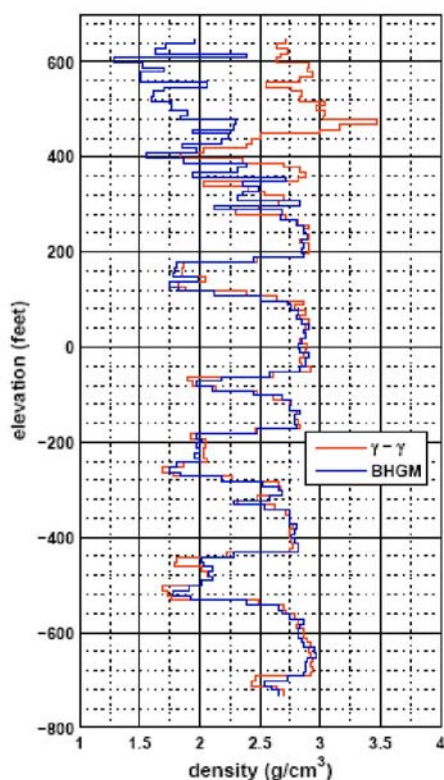


Рис. 1. Сравнение значений плотности на основе данных скважинной гравиметрии и гамма-гамма каротажа с интервалом 3.05 м



Рис. 2. Скважинный гравиметр компании Scintrex

плотности горных пород в радиусе примерно 15 м от скважины с точностью 0.02 г/см^3 .

На рис. 1 показаны диаграммы плотностей, полученные при гравиметрическом каротаже, в сравнении с данными гамма-гамма каротажа. На большей части скважины наблюдается близкое совпадение плотностей по двум методам, за исключением верхней части скважины, где гамма-гамма измерения не обеспечивают требуемой точности. Кроме того, следует отметить, что гамма-гамма каротаж характеризует плотность горных пород только непосредственно вблизи скважины.

В 2009 г. компания Scintrex (Канада) внедряла в производство новый скважинный гравиметр малых размеров (рис. 2, для сравнения размеров датчика вверху показан шарик для гольфа). Прибор имеет чувствительность 5 мкГал, немагнитный, не требует ориентации в скважине, максимальный диаметр зонда – 48 мм, максимальная длина зонда – 3.0 м, может работать до глубины 2000 м при минимальном диаметре ствола скважины – 57.2 мм, с отклонением ствола скважины от вертикали до 60° . Диапазон рабочих температур может составлять от 0° до $+70^\circ$ (для внутрискважинной секции) и от -40° до $+50^\circ$ (для секции на земной поверхности). Вертикальная координата датчика в скважине определяется с точностью 5 см.

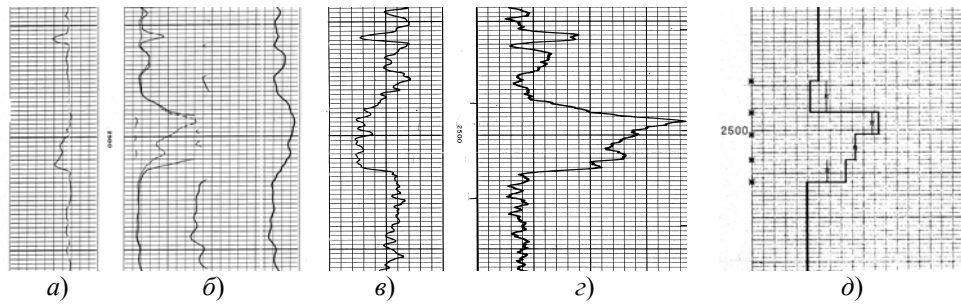


Рис. 3. Диаграммы, отражающие наличие малопроницаемого пласта, по каротажу собственного потенциала (а), боковому каротажу (б), гамма-гамма каротажу (в), нейтронному каротажу (г) и гравиметрическому каротажу (д)

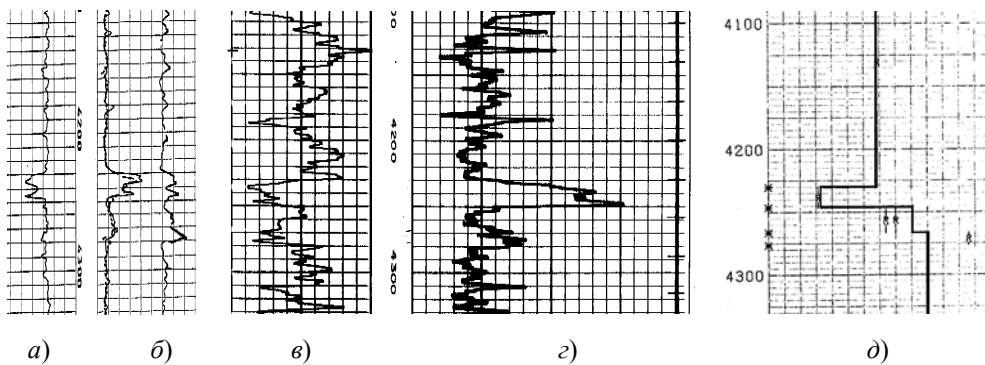


Рис. 4. Диаграммы, отражающие наличие пласта заполненного газом, по каротажу собственного потенциала (а), боковому каротажу (б), гамма-гамма каротажу (в), нейтронному каротажу (г) и гравиметрическому каротажу (д)

Рассмотрим еще два примера гравиметрического каротажа в штате Колорадо (США), полученные Endrju Blek и Alan Herring [11] в компании EDCON. В первом случае диаграммы гравиметрического каротажа даны для малопроницаемого пласта (рис. 3, д) в сравнении с данными каротажа собственного потенциала (рис. 3, а), бокового каротажа (рис. 3, б), гамма-гамма каротажа (рис. 3, в) и нейтронного каротажа (рис. 3, г).

Второй пример приведен для пласта горных пород, заполненного газом (рис. 4, д), в сравнении с диаграммами каротажа собственного потенциала (рис. 4, а), бокового каротажа (рис. 4, б), гамма-гамма каротажа (рис. 4, в) и нейтронного каротажа (рис. 4, г). Как мы видим, в первом случае по результатам гравиметрического каротажа уверенно выделяются пласты, малопроницаемые, во втором – пласты, заполненные газом. В обоих случаях результаты хорошо согласуются с материалами нейтронного каротажа – наиболее точного способа по определению плотности горных пород.

Выводы

На основании приведенных результатов исследований можно сделать вывод о том, что гравиметрический каротаж может успешно применяться для решения следующих геологических задач:

- 1) обнаружения пористости в карбонатных породах;
- 2) распознавания малопроницаемых пластов и с газом;
- 3) оценки прочности горной породы при создании газохранилища;
- 4) определения целостности породы и выявления пустот при строительстве фундаментов зданий и крупных сооружений;
- 5) наблюдения за целостностью пластовых резервуаров во время их консервации [8, 13].

Summary

V.I. Kostitsyn. Perspectives of Gravimetric Logging Development.

The article presents a theoretical basis for determining the density of rocks for different well curvatures and different layer fall angles. The possibilities of gravimetric logging are shown in comparison with the results of own capacities logging, lateral logging, gamma-gamma logging, and neutron logging on the example of the research by geophysicists in Canada and the United States.

Key words: gravimetric logging, rock density, lateral logging, gamma-gamma logging, neutron logging, Canada, the United States.

Литература

1. *Варламов А.С., Филатов В.Г.* Определение плотности горных пород и геологических объектов. – М.: Недра, 1983. – 216 с.
2. *Горожанцев А.В.* О комплексировании скважинной и наземной гравиразведки // Геофизические методы поисков и разведки месторождений нефти и газа. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 1987. – № 9 (23). – С. 95–99.
3. *Лукавченко П.И.* Гравиметрическая разведка на нефть и газ. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефт. и гор.-топл. лит., 1956. – 336 с.
4. *Лукавченко П.И., Михайлов И.Н., Симонов В.И.* Гравитационный каротаж и возможности его применения в комплексе геолого-физических исследований // Прикладная геофизика. – М.: Недра, 1975. – Вып. 80. – С. 194–199.
5. *Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л.* Детальная гравиразведка на нефть и газ. – М.: Недра, 1989. – 224 с.
6. *Маловичко А.К., Костицын В.И.* Гравиразведка. – М.: Недра, 1992. – 357 с.
7. *Чадаев М.С.* Об определении плотности пород по данным гравиметрического каротажа // Вопросы обработки и интерпретации геофизических наблюдений. – Пермь: Перм. гос. ун-т, 1974. – № 11. – С. 34–40.
8. *Nind C., Niebauer T., MacQueen J., Van Westrum D., Klopping F., Aliod D., Mann E., Francis O.* New Developments in Gravity Applications and Instruments // International Petroleum and Natural Gas Congress & Exhibition of Turkey. – 2007. – V. 1006. – P. 51–57.
9. *Nind C., Niebauer T., MacQueen J., Van Westrum D., Klopping F., Aliod D., Mann E.* Extending the Applications for Gravity Measurements // 10th SAGA Biennial Technical Meeting and Exhibition, South Africa. – 2007. – P. 67–74.
10. *Nind C., Seigel H.O., Chouteau M., Giroux B.* Development of a Borehole Gravimeter for Mining Applications // EAGE First Break. – 2007. – P. 71–77.

11. *Blek E., Herring A.T.* Introduction to Borehole Gravity. – Denver, CO: Edcon, Inc, 2008. – URL: www.edcon.com.
12. *LaFehr T.R.* Rock density from Borehole Gravity Surveys // *Geophysics*. – 1983. – V. 48, No 3. – P. 341–356.
13. *Li X., Chouteau M.* On Density Derived from Borehole Gravity // *The Log Analyst*. – 1999. – V. 40, No 1. – P. 33–38.

Поступила в редакцию
19.08.09

Костицын Владимир Ильич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой геофизики Пермского государственного университета.

E-mail: kostitsyn@psu.ru, geophysic@psu.ru