УДК 550.232

А.А.МОЛЧАНОВ, К.М.ЕРМОХИН, С.К.ЗАБУРДИН
Санкт-Петербургский горный институт

О ПЕРСПЕКТИВЕ СОЗДАНИЯ СКВАЖИННЫХ ГРАВИМЕТРОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОЧНЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Предложена разработка скважинного гравиметра на современных высокочувствительных элементах на основе пленочных акселерометров, обеспечивающих высокую надежность эксплуатации, для решения различных геологических задач: изучения межскважинного пространства вне скважины и ниже забоя скважины с целью выявления рудных тел; обнаружения целиков нефти и промытых зон нефтяных месторождений, находящихся в поздней стадии разработки; контроля закачки и расхода газа в подземных газохранилищах и др.

Исходя из реальных перечисленных задач, научно обоснована необходимость и возможность создания скважинного гравиметра-градиентометра с чувствительностью $(0{,}05\text{-}0{,}1) \cdot 10^{-5}$ м/с^2. Такая чувствительность обеспечивается за счет высокой чувствительности датчиков, компьютерного внесения температурных поправок, учета положения прибора в скважине. Приведены теоретические расчеты возможных аномалий силы тяжести и ее градиентов над объектами правильной геометрической формы: сферой, вертикальным цилиндром, горизонтальным пластом конечной мощности. Результаты расчетов сопоставлены с данными полевых наблюдений при разведке медно-колчеданных месторождений и месторождений нефти и газа. Выполнены экспериментальные исследования основных узлов аппаратуры скважинного гравиметра и проведены их лабораторные и стендовые испытания, подтвердившие правильность теоретических расчетов.

A development of down-hole gravimeter on modern high-sensitive elements based upon film accelerometers providing high exploitation reliability is introduced. It serves for solving different geological problems: interhole space study outside and below the hole face for ore bodies shaping; discovery of unrecovered oil deposits zones which are in the last stage of extraction; pumping discharge gas control in underground storage areas and some other problems.

A possibility of making down-hole gravimeter-gradiometer with $0{,}05\text{-}0{,}1 \times 10^{-5}$ m/s^2 sensitivity is scientifically grounded. Such sensitivity is achieved by means of high sensitivity sensors computers temperature correction application and registration of the device position in the bore hole. Theoretical calculations are compared with the in-field experimental results at the copper-pyrite deposits and oil and gas reservoirs. Experimental studies of the main unit components of the down-hole gravimeter, their bench tests have been carried out, that proved the correctness of theoretical calculations.

Скважинная гравиразведка развивается, в основном, в связи с поиском и разведкой рудных месторождений: меди, полиметаллов, железа и т.д. За рубежом ее пытались использовать также на месторождениях угля и соли. Работы проводились как с гравиметрами (с измерениями силы тяжести), так и с градиентометрами (с регистрацией градиента силы тяжести). Работы, проведенные по данным скважинных наблюдений, имеют, главным образом, опытный или опытно-производственный характер. Медленное развитие и внедрение скважинной гравиразведки объясняется также сложностью задач, которые приходится решать в связи с проведением, обработкой и геологическим истолкованием результатов скважинных гравитационных измерений. Появившиеся положительные результаты определяют перспективы создания скважинных гравиметров на основе новых чувствительных элементов, применения высоких технологий, достижений современной микроэлектроники.

В 70-е гг. XX в. во ВНИИГеофизики [3] были разработаны две модели скважинных гравиметров для измерений силы тяжести в нефтяных скважинах (СГ-110 и СГ-130 диаметром 110 и 130 мм соответственно). В качестве чувствительного элемента в этих приборах была использована кварцевая пружинная подвеска. Приборы были крайне ненадежны в эксплуатации и поэтому не нашли распространения.

На страницах Интернета появилась рекламная информация о разработке в США высокочувствительных гравиметров на базе акселерометров. Имеются публикации о разработке скважинного гравитационного градиентометра в Канаде [4, 6].

Работами кафедры геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых по созданию скважинных высокоточных цифровых инклинометров с непрерывной регистрацией данных измерений, использующих в качестве датчиков угловых перемещений на основе измерителей силы тяжести пленочных акселерометров, показана возможность их использования для измерений гравитационного поля в пределах чувствительности $(0,05\text{-}0,1)\cdot10^{-5}$ м/с^2 (мГал). Такая чувствительность обеспечивается оригинальной подвеской малоинерционных чувствительных элементов, автоматическим компьютерным учетом влияния температуры на изменение чувствительности датчиков и внесения поправок за неортогональность их установки. Использование высокостабильных модуляционных усилителей постоянного тока и специальных амортизаторов для защиты чувствительных элементов от вибрации и ударов позволяет планировать конструирование высоконадежного скважинного гравиметра диаметром 60 мм для измерения гравитационного поля как в обсаженных, так и в необсаженных скважинах с целью решения следующих задач рудной и нефтегазовой геологии:

- изучение межскважинного пространства вне скважины, в том числе ниже отметки забоя, с целью прогнозирования и выявления рудных тел;
- обнаружение целиков нефти и промытых зон нефтяных месторождений, находящихся в поздней стадии разработки;
- контроль закачки и расхода газа в подземных газохранилищах.

Ограничением скважинных способов измерений силы тяжести является то обстоятельство, что стандартные способы, используемые в наземных гравиметрах, связанные с эффектом взаимодействия масс, неприемлемы в условиях скважинных измерений из-за ограниченного диаметра скважины. Нами предлагаются исследования принципиально новых способов измерений, основанных на использовании пленочных акселерометров.

Как известно, гравитационный эффект, определяющий возможности гравитационных измерений, связан с различием в плотности вмещающих горных пород и искомых объектов (например, рудных тел), а также их размерами и геометрическим положением [1, 2]. Приведем, разумеется, неполный список горных пород различных месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых, которые не только отличаются по плотности от вмещающих их горных пород, но и занимают достаточно большие объемы, чтобы при благоприятных условиях заметно влиять на гравитационное поле:

	Плотность, г/см^3
Рудные месторождения	
Железные руды	4
Хромит	4
Колчеданные руды:	
медные	5
серные	4
Полиметаллические руды (свинец, цинк):	
первичные	4
окисленные	0,8-2,0
Шеелит	6
Месторождения горючих полезных ископаемых	
Газ (газонасыщенный терригенный коллектор)	1,5-2,0
Нефть (нефтенасыщенный терригенный коллектор)	2,0
Уголь:	
Антрацит	1,4-1,5
Каменный	1,3-1,4
Бурый	0,8-1,2

Торф	0,7
Нерудные месторождения	
Минеральные соли:	
Галит	2,1-2,2
Сильвин	2,0
Карналлит	1,6
Корунд	3,0-4,0
Флюорит	3
Барит	4

Примечание. Указаны средние значения или диапазоны.

Аномалеобразующий эффект обусловлен различием в плотности вмещающих горных пород, значение которых изменяется от 2,3 г/см^3 (осадочные) до 2,9 г/см^3 (кристаллические).

На принципиальные возможности создания скважинного гравиметра (градиентометра) на основе пленочных акселерометров указывает анализ возможных гравитационных эффектов, позволяющих определить требования к характеристикам разрабатываемой аппаратуры.

Так как сложные объекты являются комбинацией простейших, то принципиально достаточно для определения технических требований к измерительному каналу аппаратуры, учета искажающих факторов аномальных полей за счет рельефа дневной поверхности и пространственного положения измерительного зонда скважинного гравиметра в скважине рассмотреть аналитические выражения, определяющие аномальные поля Δg и ее градиентов для тел простейшей геометрической формы.

На этапе оценки ожидаемых аномалий Δg и ее градиентов, учитывая недостаточность литературных данных, остановимся на решении этой задачи для следующих аномалеобразующих объектов правильной геометрической формы: шара (материальной точки); цилиндрического кольца, ограниченного по вертикали, и пласта ограниченной мощности, бесконечного в горизонтальной плоскости. Геологическими аналогами шара и кольца являются условия, когда скважина непосредственно либо забурена в рудную залежь, и тогда по геофизическим данным можно оценить размеры и запасы; либо находится вне рудного тела, тогда по аномальным изменениям и их градиентам можно определить координаты аномалеобразующего объекта и его массу. Третьему объекту соответствует горизонтальный, либо пологопадающий нефте-, газонасыщенный пласт конечной мощности (в том числе угольный).

Аналитические выражения, положенные в основу расчетов, рассмотрены для случая, когда избыточная плотность $\sigma_{изб}$, вызывающая аномалии, принимается постоянной. В более сложном случае, $\sigma_{изб}$ остается под знаком интеграла и будет рассматриваться как функция одной или нескольких пространственных координат.

Поле материальной точки, как известно, выражается в векторном виде формулой

$$\Delta g = GmR/r^3,$$

где Δg – вектор аномального гравитационного поля, мГал; r – расстояние от точечной массы до точки измерения; R – радиус-вектор этой точки относительно точки измерения; m – масса точки; $G = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ см^3/(г·с^2) – гравитационная постоянная.

Все расчеты выполнены для сферического тела диаметром 1 м плотностью $\sigma_т = 1$ г/см^3 при удалении от вертикальной оси наблюдений (оси ствола скважины) на 1 м. При этих параметрах аномальное поле $\Delta g = 0{,}02$ мГал. За точку отсчета принять координаты устья скважины.

Внешнее поле шара выражается точно такой же формулой, где m – масса шара. Вертикальная составляющая этого поля

$$\Delta g_z = Gm(z-z_c)/R^3, \qquad (1),$$

где z – текущая координата; z_c – глубина залегания центра сферы.

При измерениях в скважине представляет интерес также зависимость Δg_z для профиля, проходящего непосредственно через центр сферы. При этом вне шара поле Δg_z представляется формулой (1), а внутри меняется по линейному закону:

$$\Delta g_z = 4\pi/[3R^2(z-z_c)\,\sigma_{изб}].$$

Расчеты выполнены для геометрических параметров, заданных ранее, аномальное поле при этом достигает 0,03 мГал.

При прохождении зонда через горизонтальный пласт имеем

$$\Delta g_z = \begin{cases} 2\pi G\sigma\Delta h, & z < -\Delta h/2; \\ 2\pi G\sigma(z - z_c), & -\Delta h/2 < z < \Delta h/2; \\ -2\pi G\sigma\Delta h, & z > \Delta h/2, \end{cases}$$

где Δh – мощность пласта; z_c – вертикальная координата центра сечения пласта 1, $z_c = 1$ м.

Для этой модели аномальный эффект составляет 0,1 мГал при $\sigma = 1$ г/см^3.

Для стендовой отладки зонда скважинного гравиметра необходимо иметь оптимальную модель аномалеобразующего тела, для которой точно известна зависимость измеряемого сигнала от взаимного расположения датчиков и модели. Такой моделью является цилиндрическое кольцо, надеваемое непосредственно на корпус зонда и перемещаемое вдоль него. Заметим, что подобные измерения могут быть использованы для эталонировки прибора, разумеется, при наличии эталонной массы.

Гравитационное поле цилиндра в цилиндрической системе координат описывается формулой

$$\Delta g_z^c(z) = G\sigma \int_0^R r dr \int_0^{2\pi} d\varphi \int_{-\Delta h/2}^{\Delta h/2} F d\Delta h, \qquad (2)$$

$$F = \frac{z - z_c - \Delta h}{(r^2 + (z - z_c - \Delta h)^2)^{3/2}},$$

где Δh и R – высота и радиус цилиндра, м, $\Delta h = h_2 - h_1$; h_1 и h_2 – глубина залегания верхней и нижней кромки цилиндра; z_c – глубина залегания центра тяжести цилиндра, м.

После интегрирования имеем

$$\Delta g_z^c(z) = 2\pi G\sigma \left[\sqrt{R^2 + Z_1^2} - \sqrt{R^2 + Z_2^2} + |Z_2| - |Z_1| \right];$$

$$Z_1 = z - z_c + \Delta h/2; \quad Z_2 = z - z_c - \Delta h/2.$$

Гравитационное поле для кольца с внутренним радиусом A и внешним радиусом B получается простым вычитанием масс:

$$\Delta g_z(z) = 2\pi G\sigma \left[\sqrt{B^2 + Z_1^2} - \sqrt{B^2 + Z_2^2} - \sqrt{A^2 + Z_1^2} - \sqrt{A^2 + Z_2^2} \right]. \qquad (3)$$

При перемещении скважинного снаряда внутри цилиндрического кольца из меди ($\sigma_м = 8{,}9$ г/см^3) с внутренним радиусом $A = 4$ см, внешним $B = 15$ см, высотой $\Delta h = 10$ см и массой около 56 кг, аномалия Δg превышает 0,03 мГал.

Зависимости (2) и (3) дают возможность оценить аномальный эффект, что, в свою очередь, позволяет определить допустимую погрешность измерений. В рудных районах избыточная плотность руд, как правило, превышает 1 г/см^3, в кавернах эта величина заведомо больше, в нефтяных скважинах она составляет в среднем 0,15 г/см^3.

Таким образом, при допустимой погрешности 5 % от среднего значения измеряемой величины, считая минимально обнаружимым объект диаметром 1 м, получим, что необходимый порог чувствительности измерений градиентов силы тяжести скважинным градиентометром на базе 1 м составляет около 0,001 мГал/м. Соответственно чувствительность датчиков должна быть не менее 0,001 мГал (т.е. $10^{-9}g$).

Приведенные теоретические расчеты выполнены для моделей с сечением площадью в 1 м^2. Для реальных геологических объектов аномалии Δg_z увеличиваются во внешнем пространстве: для компактных тел пропорционально их массе, для горизонтальных пластов пропорционально произведению избыточной плотности на их мощность h.

В случае, когда скважина проходит через центр сечения, удаленные от скважины на расстояние r объекты при $\sigma_{изм} = 1$ г/см^3 характеризуются уменьшением аномалий Δg пропорционально $1/r^2$.

Для решения перечисленных геологических задач необходимо, чтобы чувствительность гравиметра-градиентометра составляла $(0{,}05 \div 0{,}1) \cdot 10^{-5}$ м/с^2.

В качестве конкретных примеров рассмотрим решение задачи поисков рудных месторождений и горючих полезных ископаемых:

1. Вмещающие породы зеленокаменного комплекса медно-колчеданных месторождений Урала и Мугоджары имеют плотность 2,65-2,9 г/см^3. Медно-колчеданные руды, в зависимости от содержания сульфидов, характеризуются более высокой плотностью: от 3,7 до 4,6 г/см^3. Таким образом, их избыточная плотность составляет от 1,3 до 2 г/см^3 (в среднем 1,5 г/см^3). Крупные рудные тела имеют мощность до 100 м. Если представить модель рудной залежи в виде сферы с радиусом 50 м, то согласно выполненным теоретическим расчетам ожидаемый аномальный эффект $\Delta g = 0{,}03 \cdot 50 \cdot 1{,}5 = 2{,}25$ мГал.

2. При мощности нефтяного продуктивного пласта $m = 10$ м и избыточной плотности $\sigma = 0{,}15$ г/см^3 отрицательная аномалия гравитационного поля составит не менее –2 мГал.

Таким образом, точность измерений скважинным гравиметром на основе пленочных акселерометров $\Delta g = \pm(0{,}05 \div 0{,}1)$ мГал вполне достижима и позволяет надежно регистрировать аномальные изменения вызванные различными геологическими объектами.

На кафедре геофизических и геохимических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых института разработана конструкция скважинного прибора, изготовлены основные узлы скважинного прибора и наземной аппаратуры, проведены стендовые испытания чувствительных элементов, инклинометрического блока, амортизирующих устройств, подтвердившие результаты теоретических расчетов. Разработаны и изготовлены стенды для калибровки скважинного гравиметра и отработки его конструкции.

Таким образом, показана реальная возможность создания скважинного гравиметра-градиентометра на основе пленочных акселерометров.

Современные возможности математических методов обработки электрических сигналов (статистическая обработка данных измерений, цифровая фильтрация и др.) позволяют рассматривать предложенные решения устройств измерений гравитационного поля как перспективные для использования их в конструкциях морских и наземных гравиметров и градиентометров.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Андреев Б.А.* Геологическое истолкование гравитационных аномалий / Б.А.Андреев, И.Г.Клушин. М.: Недра, 1963.

2. Гравиразведка: Справочник геофизика / Под ред. Е.А.Мудрецовой. М.: Недра, 1981.

3. *Лукавченко П.И.* Гравитационный каротаж и возможности его применения в комплексе геологических исследований / П.И.Лукавченко, И.Н.Михайлов, В.Н.Симонов // Прикладная геофизика. 1975. Вып.80.

4. *Молчанов А.А.* Геофизические исследования горизонтальных нефтегазовых скважин / А.А.Молчанов, Э.Е.Лукьянов, В.А.Рапин / МАНЭБ. СПб, 2001.