

УДК 550.832.552

В. А. Велижанин, А. А. Волнухина, А. В. Емельянов,
Н. Г. Лобода

ООО "Нефтегазгеофизика"

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ОБОСНОВАНИИ ИНТЕРПРЕТАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОНОМНОЙ АППАРАТУРЫ ПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА

Разработана и опробована процедура определения плотности горных пород с помощью аппаратуры АПРК-ГГК-90.

Ключевые слова: каротаж, плотность, интерпретация, программирование, моделирование.

Автономный прибор плотностного гамма-гамма-каротажа (АПРК-ГГК-90) конструктивно выполнен в стальном корпусе диаметром 90 мм, в зондовой части – диаметром 108 мм [1]. Зондовая установка состоит из трех пар детекторов, развернутых относительно друг друга на 120 град. Прибор предназначен для проведения ГИС в скважинах диаметром от 120 до 180 мм при зенитном угле не менее 15 град. Прижим прибора к стенке скважины обеспечивается его собственным весом. Данная конструкция прибора создает значительные трудности при разработке интерпретационного обеспечения из-за отсутствия необходимого набора моделей с 4л-геометрией. В силу отсутствия натурных моделей с необходимым диапазоном изменения параметров (диаметр скважины, плотность промывочной жидкости и т. д.) для создания интерпретационного и методического обеспечения аппаратуры был использован аппарат математического моделирования метода Монте-Карло. Математическое моделирование проводилось с помощью пакета программ MCNP5, адаптированного для решения данной задачи.

На рис. 1 приведена геометрия скважинного прибора, использованная при моделировании показаний аппаратуры АПРК-ГГК-90. Прибор помещен в стальной кожух с внешним диаметром 108 мм и толщиной кожуха 9 мм (рис. 1, а). Источник гамма-квантов ^{137}Cs располагается на оси прибора и равномерно излучает в три коллима-

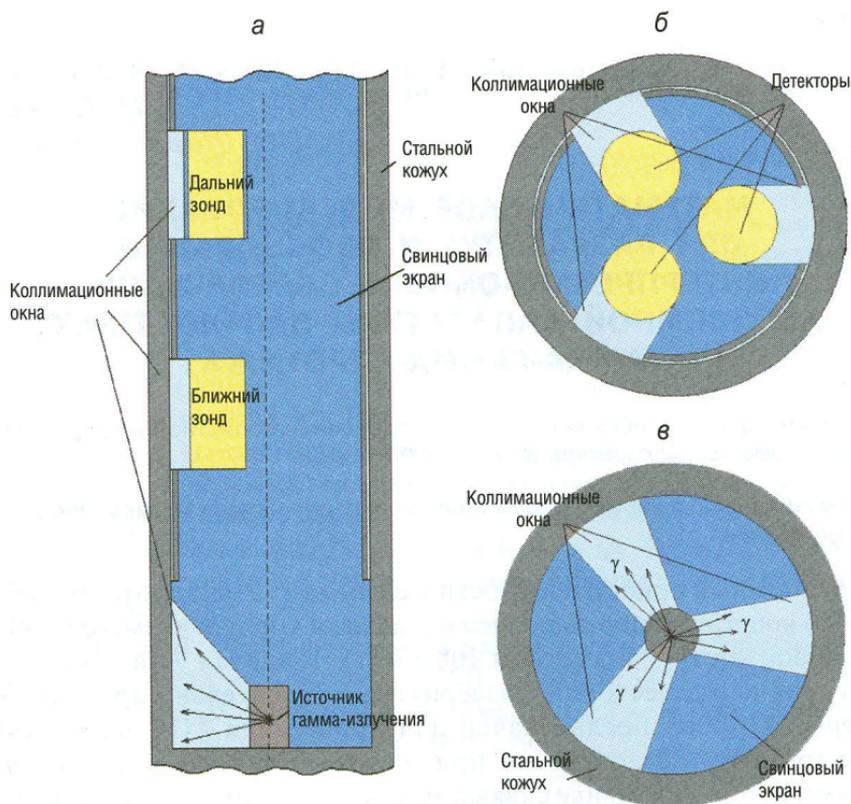


Рис. 1. Модель геометрии математического моделирования

ционных окна (рис. 1, б). Рассеянное гамма-излучение регистрируется тремя парами зондов (рис. 1, в), расположенных на фиксированных расстояниях от источника и снабженных специальными коллиматорами. Модель переноса излучения при решении задачи учитывает фотоэлектрическое поглощение с последующим учетом флуоресцентных гамма-квантов, комптоновское рассеяние гамма-квантов, а также образование пар электрон-позитрон. В расчетах не рассматривалось когерентное рассеяние гамма-квантов и не производилась генерация электронов от гамма-квантов.

Для количественной оценки влияния скважинных условий на результаты исследований и построения интерпретационных зависимостей аппаратуры АПРК-ГГК-90 была проведена серия расчетов. В

расчетах модель породы представляла собой песчаник плотностью 2,65, 2,32, 1,99 г/см³ (что соответствует пористости породы 0, 20, 40%). Расчеты проводились для скважин диаметром 124, 146, 200 и 250 мм. В табл. 1 приведены результаты расчетов, выполненных при различном заполнении скважины: сухая скважина и скважина, заполненная промывочной жидкостью плотностью 1 и 1,2 г/см³. Результаты вычислений приведены в условных единицах. За условную единицу принимаются показания аппаратуры, рассчитанные в воде. В табл. 1 приведены данные, соответствующие показаниям детектора, прижатого к стенке скважины.

Влияние промежуточной среды рассматривалось при отклонении прибора от стенки скважины до 2 см. В табл. 2 приведены результа-

Таблица 1

Влияние диаметра скважины и плотности промывочной жидкости на показания зондов аппаратуры АПРК-ГГК-90

Плотность породы, г/см ³	Диаметр скважины, мм								
	146	200	250	146	200	250	146	200	250
	Сухая скважина			Плотность ПЖ 1 г/см ³			Плотность ПЖ 1,2 г/см ³		
МЗ, у. е.									
2,65	0,466	0,477	0,479	0,456	0,464	0,468	0,455	0,462	0,466
2,32	0,558	0,571	0,571	0,553	0,557	0,562	0,549	0,558	0,558
1,99	0,667	0,672	0,674	0,657	0,662	0,666	0,658	0,661	0,662
БЗ, у. е.									
2,65	0,0627	0,0964	0,1221	0,0476	0,0589	0,0669	0,0466	0,0563	0,0600
2,32	0,1086	0,1401	0,1667	0,0920	0,0979	0,1092	0,0827	0,0935	0,0998
1,99	0,188	0,231	0,250	0,170	0,182	0,184	0,160	0,175	0,183
БЗ/МЗ, у. е.									
2,65	0,134	0,201	0,254	0,104	0,127	0,143	0,102	0,122	0,123
2,32	0,195	0,245	0,292	0,166	0,176	0,194	0,151	0,168	0,179
1,99	0,283	0,347	0,372	0,260	0,272	0,276	0,243	0,265	0,276

Таблица 2

Влияние промежуточной среды на показания аппаратуры ГГК-П

Плотность породы, $г/см^3$	Диаметр скважины, мм					
	146	200	250	146	200	250
Отклонение прибора от стенки скважины 1 см						
	Плотность ПЖ 1 $г/см^3$			Плотность ПЖ 1,2 $г/см^3$		
МЗ, у. е.						
2,65	0,646	0,657	0,662	0,618	0,628	0,633
2,32	0,720	0,729	0,731	0,693	0,698	0,704
1,99	0,799	0,805	0,807	0,765	0,774	0,775
БЗ, у. е.						
2,65	0,0866	0,102	0,113	0,0725	0,0853	0,0950
2,32	0,141	0,155	0,171	0,121	0,141	0,142
1,99	0,236	0,2501	0,255	0,207	0,227	0,230
БЗ/МЗ, у. е.						
2,65	0,134	0,155	0,171	0,117	0,136	0,150
2,32	0,195	0,213	0,235	0,175	0,202	0,201
1,99	0,296	0,311	0,316	0,271	0,294	0,297

ты расчетов для детектора, наиболее приближенного к стенке скважины.

Для привязки и контроля результатов математического моделирования были выполнены экспериментальные работы с аппаратурой АПРК-ГГК-90 на доступных натуральных моделях пластов. Эти работы позволили провести оценку погрешности выполненных расчетов, а также привязку их к экспериментальным данным.

По результатам модельных работ и математического моделирования были построены интерпретационные зависимости для аппаратуры АПРК-ГГК-90. На рис. 2 приведен пример интерпретационных зависимостей аппаратуры.

Автономная аппаратура не оснащена прижимным устройством, поэтому прибор может вращаться вокруг собственной оси. При об-

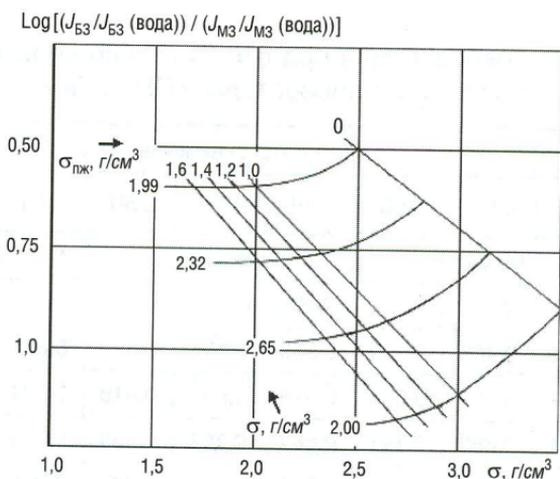


Рис. 2. Зависимость отношения показаний зондов от плотности породы и промывочной жидкости для диаметра скважины 200 мм

работке зарегистрированных данных необходимо учитывать положение детектора относительно стенки скважины. Смоделированы также показания аппаратуры АПРК-ГГК-90 для различных положений детектора. Угол поворота прибора изменялся от 0° (детектор прижат к стенке скважины) до 180° (детектор максимально удален от стенки скважины) с шагом 30° . В табл. 3 приведены полученные данные.

Результаты математического и натурного моделирования позволили обосновать два алгоритма обработки показаний – итерационный алгоритм и алгоритм восстановления.

Алгоритм восстановления основан на предположении, что для прижатого к стенке скважины прибора показания J малого (J_{M3}) и большого (J_{B3}) зондов связаны с углом поворота φ прибора зависимостью вида $J(\varphi) = A \times \{1 + \gamma \times \sin(\varphi - 90)\}$, где φ принадлежит интервалу $[0, 180]$. Данные моделирования показали, что значения большого зонда (БЗ) аппаратуры АПРК-ГГК-90 в диапазоне диаметров скважин от 120 до 250 мм и плотности породы от 1,70 до 3,00 g/cm^3 практически идеально аппроксимируются зависимостью $\log\{J_{B3}(\varphi)\} = \log(A_{B3}) \times \{1 + \gamma \times \sin(\varphi - 90)\}$. Для малого зонда (МЗ) более предпочтительна зависимость вида $J_{M3}(\varphi) = A_{M3} \times \{1 + \gamma \times \sin(\varphi - 90)\}$, но и она не идеальна. Результат восстановления, которым является

Таблица 3

Влияние угла поворота прибора относительно собственной оси
на показания аппаратуры АПРК-ГГК-90

Угол поворота прибора	Диаметр скважины, мм								
	146	200	250	146	200	250	146	200	250
	2,65 г/см ³			2,32 г/см ³			1,99 г/см ³		
МЗ, у. е.									
0	0,456	0,465	0,469	0,553	0,557	0,562	0,657	0,662	0,667
30	0,487	0,517	0,534	0,578	0,602	0,618	0,684	0,704	0,714
60	0,581	0,682	0,741	0,664	0,752	0,798	0,749	0,819	0,856
90	0,719	0,901	0,978	0,781	0,931	0,994	0,845	0,965	1,008
120	0,854	1,035	1,050	0,893	1,039	1,049	0,934	1,039	1,044
150	0,937	1,059	1,038	0,961	1,055	1,034	0,985	1,049	1,031
180	0,962	1,062	1,032	0,982	1,055	1,029	1,001	1,051	1,026
БЗ, у. е.									
0	0,0476	0,0589	0,0669	0,0920	0,0979	0,109	0,171	0,180	0,184
30	0,0531	0,0712	0,0839	0,102	0,115	0,126	0,171	0,195	0,192
60	0,0758	0,126	0,159	0,119	0,167	0,206	0,210	0,261	0,296
90	0,121	0,254	0,360	0,174	0,301	0,420	0,257	0,382	0,483
120	0,185	0,455	0,665	0,243	0,504	0,670	0,334	0,575	0,751
150	0,247	0,608	0,843	0,308	0,659	0,855	0,385	0,708	0,883
180	0,280	0,687	0,908	0,343	0,705	0,934	0,416	0,784	0,933

$\{A_{МЗ} \times \{1 - \gamma\}\}$, требует корректировки, если $\{A_{МЗ} \times \{1 - \gamma\}\}$ меньше любого из трех зондов МЗ. Величина корректировки в зависимости от угла поворота прибора и плотности породы может достигать 2–3%. Выполненные модельные работы также явились основой и для установления корректировочной функции.

Итерационный алгоритм в методическом плане еще более насыщен интерпретационными зависимостями. Суть алгоритма состоит в следующем. По рассчитанному значению плотности по первичным

данным, диаметру скважины d_c и плотности промывочной жидкости $\sigma_{пж}$ по палеточным зависимостям определяется отношение максимальных показаний МЗ к минимальным $\alpha = J_{МЗmax}/J_{МЗmin}$. По соотношению параметров α и $\beta = (1 + \gamma)/(1 - \gamma)$ с привлечением палеточных зависимостей $H(d_c, (\alpha - \beta))$ определяется толщина промежуточного слоя $h = H(d_c, (\alpha - \beta))$ между прибором и стенкой скважины и выполняется корректировка плотности в модели $\sigma_{испр} = \sigma + \Delta\sigma(h, \sigma_{пж}, d_c)$. Здесь $\Delta\sigma(h, \sigma_{пж}, d_c)$ – палеточная зависимость. Описанная процедура повторяется до выполнения условия $abs(\sigma_{испр} - \sigma) < 0,01 \text{ г/см}^3$. Все необходимые зависимости, используемые в данном алгоритме, также были получены по результатам математического моделирования аппаратуры АПРК-ГГК-90.

Опробование описанных выше процедур определения плотности породы по данным каротажа аппаратурой АПРК-ГГК-90 к настоящему времени проведено на большом количестве скважинных материалов. Результаты опробования показали хорошую сходимость двух алгоритмов обработки при условии использования корректных данных о плотности промывочной жидкости и диаметре скважины, что является дополнительным подтверждением удовлетворительной для практического использования точности выполненных расчетов интерпретационных зависимостей аппаратуры АПРК-ГГК-90.

ЛИТЕРАТУРА

1. Велижанин В. А., Емельянов А. В., Хаматдинов Р. Т., Черменский В. Г. Автономный прибор плотностного гамма-гамма-каротажа для горизонтальных и сильнонаклонных скважин // НТВ "Каротажник". Изд. АИС. 2007. № 3. С. 74–79.

Получена 20.03.08