

УДК 550.832.552

В. Р. Хаматдинов
ООО "Нефтегазгеофизика"

АВТОНОМНАЯ АППАРАТУРА ПЛОТНОСТНОГО ГАММА-ГАММА-КАРОТАЖА НАКЛОННЫХ И ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Рассмотрены результаты разработки автономного прибора плотностного гамма-гамма-каротажа и результаты его промышленного внедрения. Приведены технические характеристики разработанной аппаратуры и результаты мониторинга метрологических характеристик зондовых установок при серийном производстве аппаратуры.

Ключевые слова: скважина, открытый ствол, радиоактивный каротаж, автономная скважинная аппаратура, комплекс.

Возрастающие объемы бурения горизонтальных и наклонных скважин, боковых стволов из скважин старого фонда диктуют необходимость промышленного освоения автономной аппаратуры плотностного гамма-гамма-каротажа (ГГК-П) с метрологическими характеристиками, не уступающими лучшим образцам аппаратуры, эксплуатируемой с каротажным кабелем.

Автономная аппаратура ГГК-П в комплексе с аппаратурой других методов (ГК, ННК, АК, ЭК, ИК, инклинометрия) должна доставляться на забой с помощью бурового инструмента и выдерживать механические нагрузки, воздействующие на буровой инструмент.

Метод ГГК-П должен обеспечивать измерение плотности горных пород независимо от их литотипа (песчаники, доломиты, известняки), типа используемых буровых растворов, в том числе с добавками утяжелителей (барит, гематит) в диапазоне температур на забое скважины до 150 °С (реже до 175–200 °С) и гидростатического давления до 120–140 МПа.

Допустимая погрешность измерения плотности горных пород определяется исходя из требуемой погрешности определения их общей пористости (k_n). Уменьшение k_n на 1% абс. вызывает приращение плотности $\Delta\sigma = (\sigma_m - \sigma_f)/100 \text{ г/см}^3$. Для указанных литотипов горных пород при заполнении порового пространства пород пресной водой оно составит 0,0165–0,0186 г/см³.

Погрешность измерений при реальном каротаже скважин зависит от ряда факторов, определяющих суммарную погрешность:

- погрешность измерений собственно аппаратурой;
- погрешности, вносимые вариациями по стволу скважин толщины, плотности и вещественного состава промежуточной среды между зондом ГГК-П и горной породой;
- интервал осреднения по мощности пласта;
- скорость каротажа.

Суммарная погрешность в этом случае, приведенная к мощности пласта в 1 м и определенная для каждого типа аппаратуры и допустимых скоростей каротажа, устанавливается не более $\pm 0,03 \text{ г/см}^3$, что в пересчете на k_{Π} составит не более $\pm 2\%$ абс.

Для достижения указанной погрешности оценки k_{Π} основная погрешность измерений плотности пород аппаратурой при серийном заводском выпуске не должна превышать $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$. Определение ее проводится на аттестованных моделях горных пород (погрешность аттестации не более $\pm 0,005 \text{ г/см}^3$) при отсутствии промежуточной среды.

Влияние промежуточной среды определяется путем измерений на моделях горных пород с имитаторами глинистой корки различного состава и толщины. Влияние литотипа пород определяется путем измерений на моделях пород с существенно отличающимся вещественным составом.

Алгоритм измерения плотности горных пород

В общем виде алгоритм измерения плотности горных пород двух-зондовой установки ГГК-П имеет следующий вид:

$$\sigma = \sigma_{\text{эт}} - A \lg \frac{J_{\text{БЗ}}}{J_{\text{БЗ эт}}} + B \frac{J_{\text{МЗ}}}{J_{\text{МЗ эт}}}, \quad (1)$$

где σ – измеряемое значение плотности пород, г/см^3 ; $\sigma_{\text{эт}}$ – значение плотности эталона, г/см^3 ; $J_{\text{БЗ}}$, $J_{\text{БЗ эт}}$, $J_{\text{МЗ}}$, $J_{\text{МЗ эт}}$ – скорости счета интенсивности рассеянного регистрируемого гамма-излучения большого и малого зондов, с^{-1} ; A , B – постоянные величины.

Для корректной работы алгоритма (1) необходимо достаточно точно установить значения $J_{\text{БЗ эт}}$ и $J_{\text{МЗ эт}}$, зависящие от активности источника гамма-излучения. Поэтому перед началом измерений не-

посредственно в полевых условиях с помощью полевого калибратора необходимо определить $J_{БЗ\text{ эт}}$ и $J_{МЗ\text{ эт}}$, что значительно усложняет проведение измерений.

При условии, что параметры зонда (длина, углы коллимации, спектральные чувствительности детекторов и т. д.) подобраны таким образом, что обеспечивается равенство констант А и В, алгоритм (1) приобретает вид:

$$\sigma = \sigma_{\text{эт}} - A \lg \frac{J_{БЗ}}{J_{МЗ}} C, \quad (2)$$

где $C = \frac{J_{МЗ\text{ эт}}}{J_{БЗ\text{ эт}}}$ – величина, не зависящая от активности источника гамма-излучения, стабильно сохраняет свое значение до замены детекторов, определяется на базе при техобслуживании прибора и позволяет проводить замеры на скважине без применения полевого калибратора.

Алгоритм (2) позволяет проводить компенсацию влияния промежуточной среды на показания прибора и реализуется при условии существенно большей разницы в чувствительностях показаний зондов к изменению плотности пород и одинаковой чувствительности к изменению характеристик промежуточной среды в рабочем диапазоне.

Настройка компенсационной характеристики каждого прибора проводится при выпуске аппаратуры на моделях плотности горных пород путем подбора соответствующих спектральных чувствительностей зондов.

Впервые алгоритм данного вида был реализован в 1985 г. в аппаратуре СГП2-АГАТ, что значительно упростило серийное производство и способствовало широкому промышленному внедрению метода ГГК-П [1].

В 2012 г. в ООО “Нефтегазгеофизика” выполнена НИОКР по созданию автономного прибора плотностного гамма-гамма-каротажа горизонтальных скважин.

Результаты исследований зондовой установки автономного прибора плотностного гамма-гамма-каротажа на моделях горных пород

За основу разработки зондовой установки был взят описанный выше алгоритм определения плотности горных пород. На рис. 1 приведены результаты измерений на моделях горных пород с имитацией промежуточной среды между зондом ГТК-П и горной породой. Модели представляют собой полупласты из следующих компонентов:

- сплав алюминия (АДО);
- спрессованные чередующиеся листы алюминия и магния толщиной по 2 мм (Al + Mg);
- листы алюминия и титана (Al + Ti);
- сплав алюминия (В-95);
- сплав магния (Mg);
- листы магния и титана (Mg + Ti);
- мрамор.

Вещественный состав и плотность моделей перекрывает рабочий диапазон эксплуатации прибора в терригенных и карбонатных разрезах горных пород. Характеристика моделей приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики моделей плотности и индекса фотоэлектрического поглощения

Модель	Состав модели	σ , г/см ³	Ре, барн/эл
ГСО 1	Al (марки АДО)	2,594	2,660
ГСО 2	Al + Mg	2,119	2,660
ГСО 3	Мрамор	2,703	5,080
ГСО 4	Mg (марки МА-14)	1,730	5,600
СОП 1	Al + Ti	2,910	6,950
СОП 2	Al (марки В-95)	2,720	6,500
СОП 3	Mg + Ti	2,160	6,760

Промежуточная среда имитировалась резиной с плотностью 1,26 г/см³ и толщиной 10 (10Р) и 20 (20Р) мм. Промежуточная среда при наличии утяжелителя в буровом растворе имитировалась смесью глино-

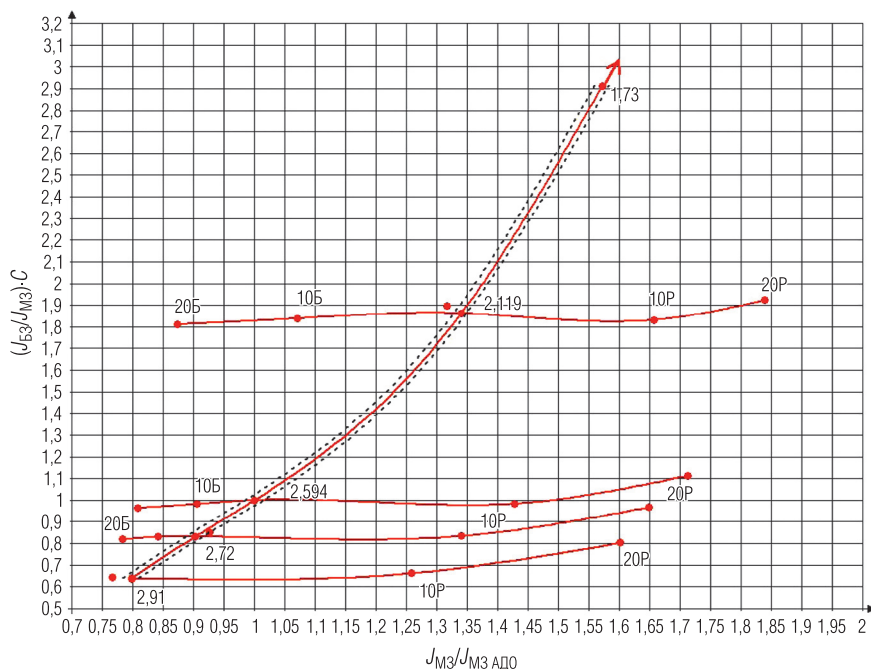


Рис. 1. Результаты измерений зондом ГПК-П на моделях горных пород с имитацией промежуточной среды

порошка с баритом, скрепленных эпоксидной смолой толщиной 10 (10Б) и 20 (20Б) мм.

Алгоритм измерения плотности, полученный по результатам проделанных модельных работ, имеет вид: $\sigma = 2594 - 1710 \lg \frac{J_{Б3}}{J_{М3}} C$, $C = \frac{J_{М3 \text{ эт}}}{J_{Б3 \text{ эт}}}$ – отношение показаний ближнего и дальнего зондов в эталонной среде (блок алюминия марки АДО).

Результаты и погрешности измерений плотности, полученные для различных толщин промежуточной среды, показали эффективность подхода автора к проблеме.

На рис. 2 приведены результаты определения толщин глинистой корки в различных отложениях при бурении с использованием типовых глинистых растворов по данным измерений внутреннего диаметра

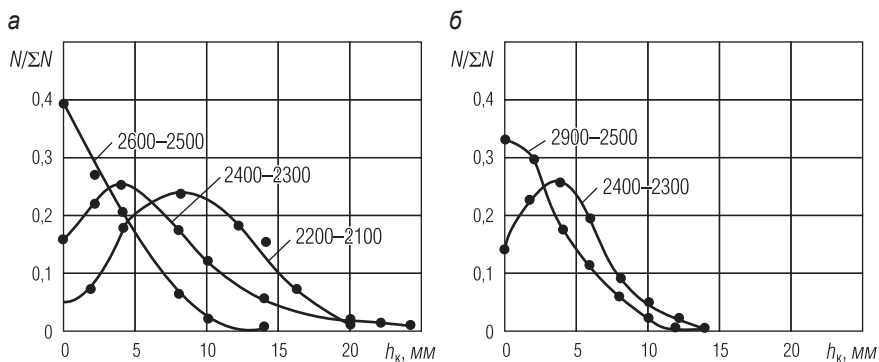


Рис. 2. Распределение толщин глинистой корки в пластах различной плотности: а – терригенные отложения Западной Сибири; б – карбонатные отложения Узбекистана. Шифр кривых – плотность пород, кг/м^3 [2]

скважины каверномером и микрокаверномером аппаратуры микро-бокового каротажа [2]. Из этих данных следует, что в большинстве случаев толщина глинистой корки в интервалах коллекторов не превышает 20 мм и уверенно может компенсироваться при работе с двухзондовой аппаратурой ГГК-П.

На рис. 3 приведена диаграмма плотности среды в скважине в интервале коллектора (по Ю. А. Гулину) с образовавшейся глинистой коркой. Пунктирной линией обозначена граница, до которой зонд ГГК-П прижимается к стенке скважины при усилии прижима 20 кг. Примерно этой линии достигает и зонд БМК. При этом между зондом ГГК-П и горной породой остается среда с изменяющейся от 1,4 до 1,8 г/см^3 плотностью. Такая среда с толщиной до 20 мм также будет компенсироваться при измерениях с погрешностью не более $\pm 0,02 \text{ г/см}^3$.

При наличии промежуточной среды без утяжелителя бурового раствора (барит) показания обоих зондов ГГК-П с увеличением толщины возрастают, а при наличии в глинистой корке барита за счет фотоэлектрического поглощения рассеянных гамма-квантов показания резко снижаются.

Выполненные эксперименты показали, что во всем диапазоне изменения плотности и вещественного состава пород и промежуточной среды при ее толщине, не превышающей 10–15 мм, показания зонда

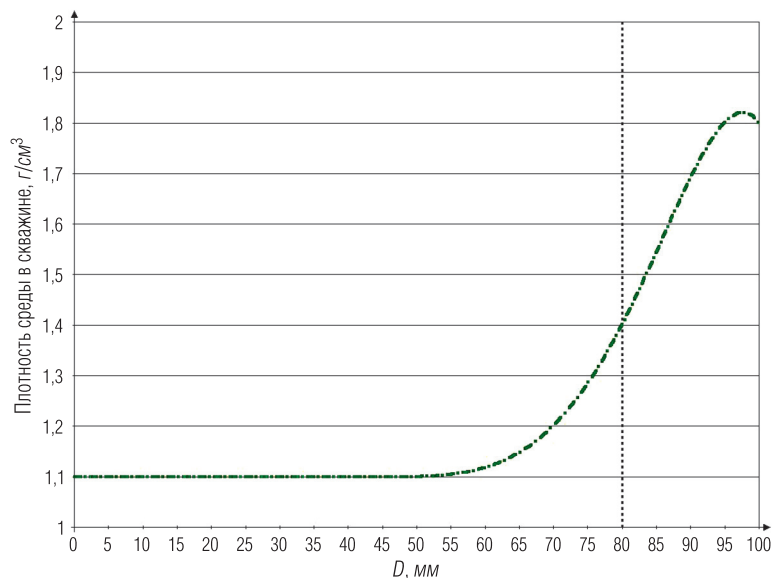


Рис. 3. Диаграмма плотности среды в скважине в интервале коллектора с образовавшейся глинистой коркой (по Ю. А. Гулину)

воспроизводят значения плотности с погрешностью, не превышающей $\pm 0,025 \text{ г/см}^3$. При дальнейшем увеличении толщины промежуточной среды ее влияние на воспроизводимые значения плотности усиливается и становится существенным (более $0,08 \text{ г/см}^3$) при $H = 20 \text{ мм}$ и увеличении плотности породы, начиная с $2,59 \text{ г/см}^3$.

Из этих данных следует, что в области высоких плотностей пород погрешность измерений не превысит $0,03 \text{ г/см}^3$ при толщине промежуточной среды до 15 мм , что вполне достаточно для реальных измерений в скважине исходя из распределений формирования глинистой корки против коллекторов нефти и газа.

Наиболее сложным является исключение влияния локальных каверн, особенно при высоких плотностях горных пород, что также видно из данных рис. 1. Для решения этой задачи в кабельных приборах ГГК-П зачастую у нас в России и абсолютно во всех зарубежных компаниях используются выносные зондовые установки ГГК-П, обеспечивающие значительное снижение влияния неровнос-

тей рельефа стенок скважин. Для снижения влияния этого фактора в рассматриваемой аппаратуре осуществлен механический вынос зонда ГТК-П (около 1 см) для того, чтобы зонд длиной менее 80 см лучше вписывался в локальную каверну, уменьшая тем самым суммарную толщину промежуточной среды.

На рис. 4 и 5 приведены кроссплоты по результатам измерений на моделях и скважинных измерений в терригенном разрезе в двух номинальных диаметрах бурения 124 и 143 мм. На рис. 6 приведен кроссплот по результатам измерений на моделях и скважинных измерений в карбонатном разрезе при диаметре бурения 215,9 мм. По данным всех этих рисунков видно, что в условиях реальных измерений для преобладающего количества пластов измерения были выполнены в области между $H = 0$ и $H = 10P$, где обеспечивается компенсация влияния промежуточной среды с погрешностью не более $\pm 0,025 \text{ г/см}^3$.

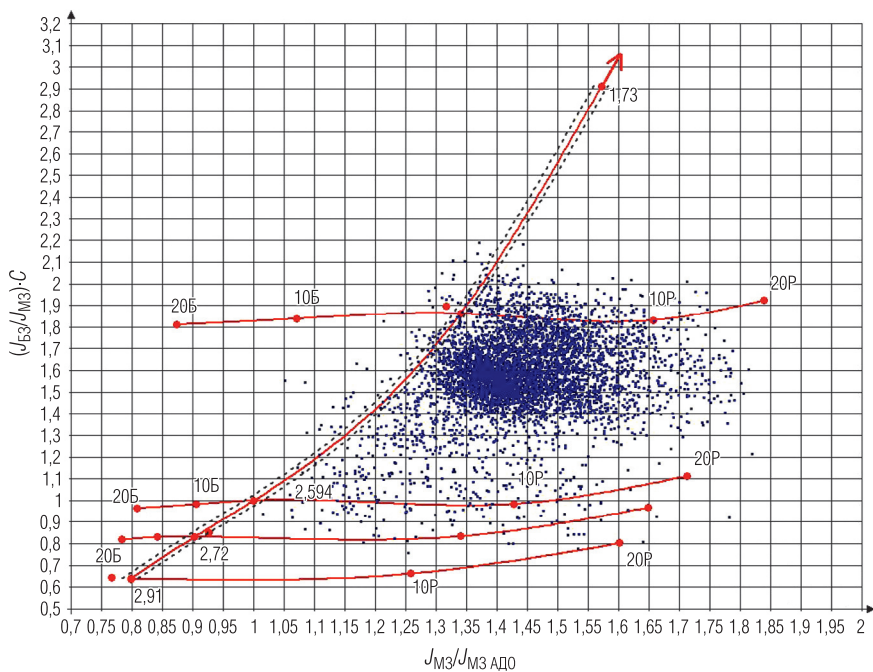


Рис. 4. Кроссплот сравнения результатов модельных работ прибором и показаний зондов ГТК-П в скважине (терригенный разрез; диаметр долота 124 мм)

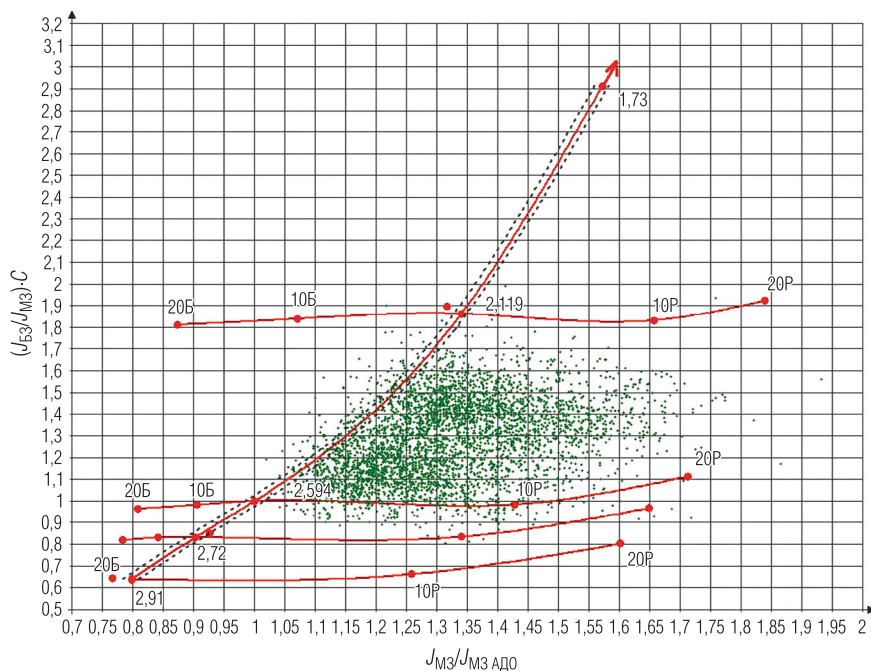


Рис. 5. Кроссплот сравнения результатов модельных работ прибором и показаний зондов ГГК-П в скважине (терригенный разрез; диаметр долота 143 мм)

Воспроизводимость метрологических характеристик

Воспроизводимость метрологических характеристик аппаратуры при серийном заводском выпуске оценивалась сравнением результатов измерений на моделях горных пород с четырнадцатью приборами, выпущенными в различное время, начиная с 2012 г. При этом погрешность измерений в диапазоне плотностей от 1,7 до 3,0 г/см³ не превышает $\pm 0,01$ г/см³. Промежуточная среда отсутствовала.

Компенсация промежуточной среды с плотностью 1,26 г/см³ (имитировалась резиной) с толщиной до 10 мм осуществлялась с погрешностью не более $\pm 0,02$ г/см³, дальнейшее увеличение H до 20 мм приводит к увеличению погрешности измерений более 0,08 г/см³ на образцах с плотностью 2,5–2,9 г/см³ и не превышает $\pm 0,03$ г/см³ при более низких значениях плотности.

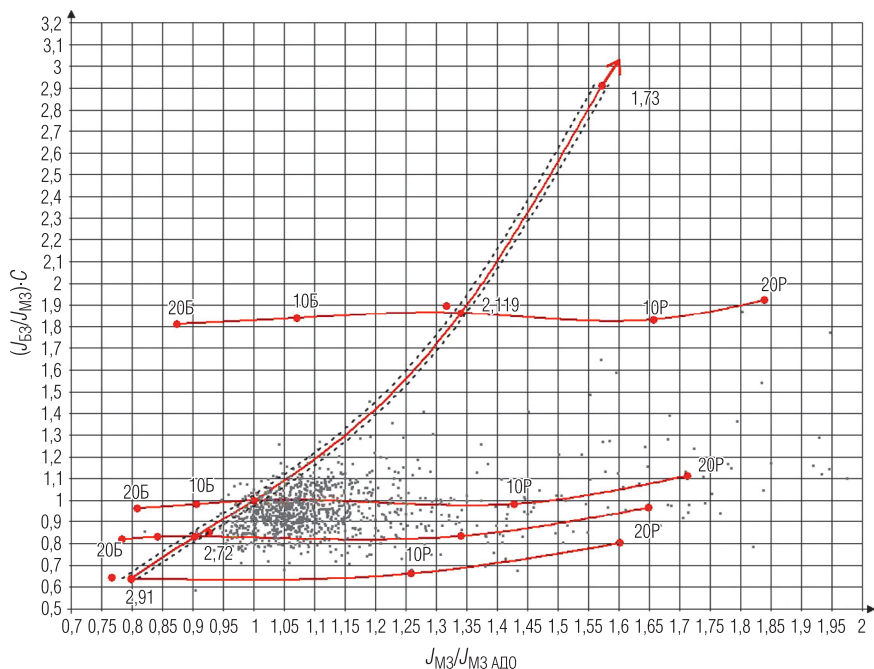


Рис. 6. Кроссплот сравнения результатов модельных работ прибором и показаний зондов ГГК-П в скважине (карбонатный разрез; диаметр долота 215,9 мм)

Различие плотностей измеренных различными комплектами аппаратуры при наличии промежуточной среды повторяются с отклонениями не более $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$ при $H = 10 \text{ мм}$ и не более $\pm 0,03 \text{ г/см}^3$ при $H = 20 \text{ мм}$.

Эффективно осуществляется компенсация влияния промежуточной среды при наличии в буровом растворе утяжелителя из барита.

Конструкция аппаратуры

Общий вид скважинного прибора представлен на рис. 7. Прибор состоит из модуля плотностного гамма-гамма-каротажа 2ГГК-А-108-120/80 (поз. 1) и блока управления памятью с аккумуляторным блоком питания (поз. 2). Прижатие прибора к стенке скважины осуществляется прижимной рессорой. Для обеспечения термостойкости

сцинтилляционные детекторы гамма-излучения в комплекте с ФЭУ расположены в сосуде Дьюара. Сверху и снизу прибора предусматриваются шарнирные соединительные устройства, обеспечивающие лучшие условия прижатия зонда прижимной пружиной. Для исключения проворачивания прибора в целом (или в сборке всего комплекса приборов, собранных для каротажа) сверху сборки устанавливается головка свободного вращения, рассчитанная на свободное вращение при нагрузке до 10 т.

Технические характеристики прибора представлены в табл. 2.

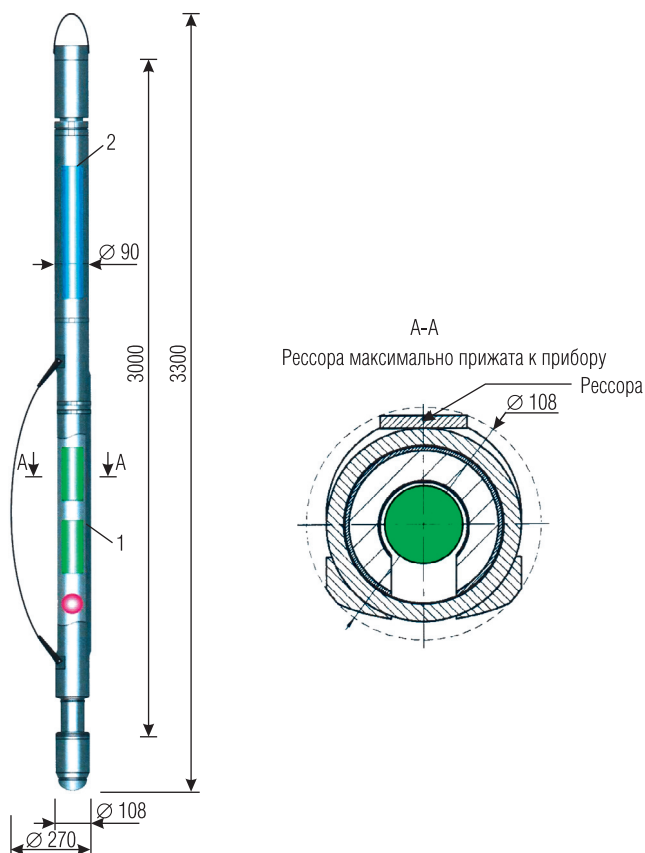


Рис. 7. Общий вид скважинного прибора

Таблица 2

**Технические характеристики прибора плотностного
гамма-гамма-каротажа 2ГГК-А-108-120/80**

Параметры	Диапазон
Диапазон измерения объемной плотности пород, г/см^3	1,7–3,0
Основная абсолютная погрешность, г/см^3	Не более 0,01
Погрешность измерения плотности пород в скважинных условиях, г/см^3	Не более 0,03
Литотип пород	Песчаники, доломиты, известняки (терригенные и карбонатные отложения)
Тип промывочной жидкости	Любой, в том числе с утяжелителями
Диаметр исследуемых скважин, мм	120–350
Длина, мм	2100
Макс. диаметр, мм	108
Масса, кг	90
Питание, внешнее, автономное, В	12
Макс. рабочая температура, °С	150
Макс. рабочее давление, МПа	120
Время работы в автономном режиме и в режиме записи, ч, не менее	24
Максимальная осевая нагрузка на сжатие, т	60
Максимальная осевая нагрузка на растяжение, т	60
Скорость каротажа, м/ч	От 400 до 800 при активности источника от $1 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^{10}$ Бк

Скорость каротажа

Скорость каротажа определяется в основном статистическим разбросом показаний большого зонда.

Регламентированные погрешности измерений плотности пород и скорости каротажа обеспечиваются при использовании источника гамма-излучения Cs-137 с активностью от $1 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^{10}$ Бк.

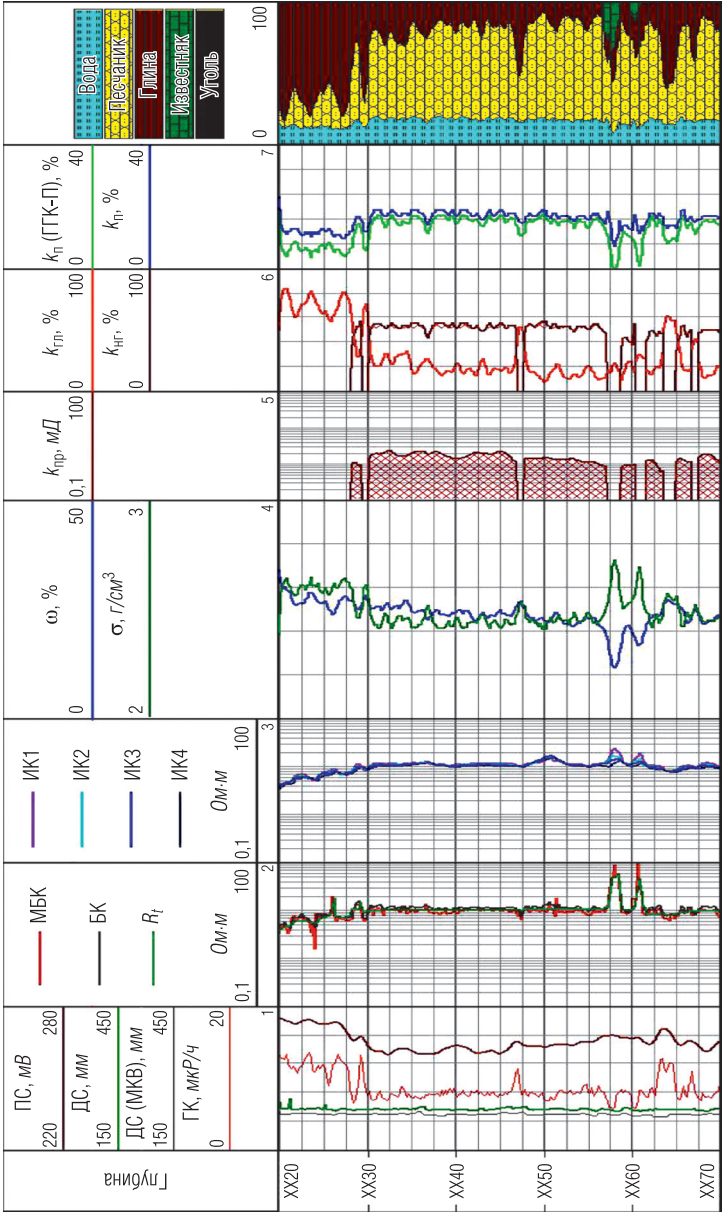


Рис. 8. Результаты интерпретации комплекса ГИС

Объемы внедрения и результаты скважинных измерений

С 2012 до середины 2014 гг. серийно выпущены и внедрены в производство в России и в странах СНГ 15 комплектов аппаратуры. До конца 2014 г. запланирована передача в производство еще 12 комплектов.

В производственных предприятиях выполнено более сотни скважинных измерений. В первой половине 2014 г. собственными силами одним комплектом аппаратуры выполнены исследования в 30 скважинах.

На рис. 8 приведена типовая диаграмма измерения плотности горных пород в комплексе с другими методами ГИС.

Плотностной каротаж наиболее информативен при построении литологической модели разреза и определении коэффициента общей пористости.

При сопоставлении $k_{п.общ}$, определяемой по методике кросс-плотов (рис. 9) и $k_{п.общ}$ по плотностному каротажу в коллекторах значения совпадают (рис. 8, колонка 7).

Современная аппаратура плотностного каротажа стандартизована и позволяет исключать систематические отклонения по разновременным исследованиям по различным скважинам (рис. 10).

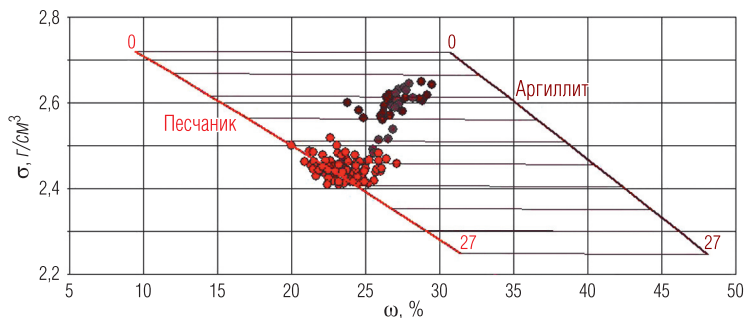


Рис. 9. Результаты оценки общей пористости пород по комплексу ГГК-П-ННК-Т

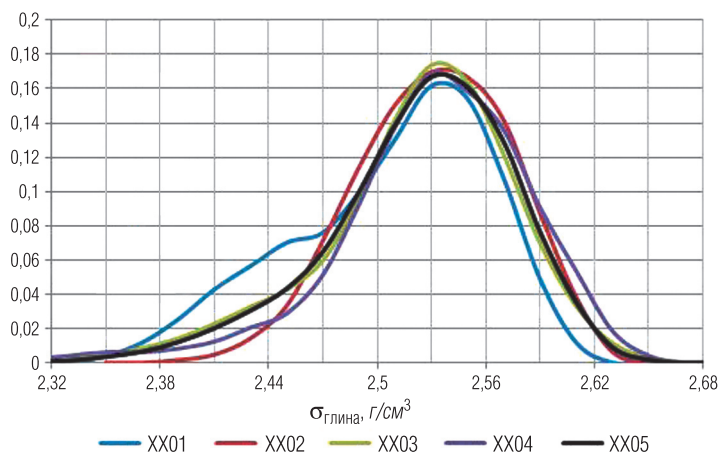


Рис. 10. Распределение плотности пород по различным скважинам на одном месторождении

Заключение

В результате выполненной НИОКР создан и освоен серийный выпуск автономного прибора ГТК-П с метрологическими характеристиками, необходимыми для требований практики.

Широкие промышленные испытания показали возможность использования прибора в скважинах с диаметром от 122 до 350 мм в горизонтальных, сильнонаклонных скважинах и в боковых стволах скважин, а также при исследовании S-образных скважин с выходом практически на вертикальные участки.

При использовании источника гамма-квантов Cs-137 с активностью $1,28 \cdot 10^{10}$ Бк скорость каротажа при приемлемых для практики погрешностях измерений возможна до 400 м/ч при осреднении результатов по мощности 1 м и 720 м/ч при осреднении результатов по мощности 2 м.

Увеличение активности источника до $3 \cdot 10^{10}$ Бк обеспечивает уверенное выполнение каротажа с необходимой точностью измерений при скоростях до 720–800 м/ч.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Хаматдинов Р. Т., Зотов А. Ф., Еникеева Ф. Х.* Методические указания по проведению плотностного гамма-гамма-каротажа в нефтяных и газовых скважинах аппаратурой СГП2-АГАТ и обработке результатов измерений. Калинин: ВНИГИК, 1988.
2. *Хаматдинов Р. Т.* Определение плотности и литологии горных пород в разрезах скважин гамма-гамма-методом: Дисс. ... докт. техн. наук. Калинин: НПО "Союзпромгеофизика", МНТК "ГЕОС", 1988.

Рецензент канд. техн. наук В. Н. Даниленко