## ИЗВЕСТИЯ ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО Том 96,1 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1959 г.

# ПРИМЕНЕНИЕ УСКОРИТЕЛЕЙ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ

### В. М. ЗАПОРОЖЕЦ, В. В. СУЛИН

(Представлено II межвузовской конференцией по электронным ускорителям)

Эффективность радиометрических методов исследования разрезов скважин может быть значительно повышена в результате создания малогабаритных ускорителей заряженных частиц, пригодных для работы в буровых скважинах — скважинных генераторов нейтронов и гамма-квантов.

Преимущества скважинных ускорителей перед естественными источниками радиоактивных излучений связаны с возможностью получения с их помощью излучения большей интенсивности и большей энергии, а также, что наиболее существенно, с возможностью управлять энергией и интенсивностью излучения.

Мощность источников излучения, изготовленных из радиоактивных веществ, по соображениям техники безопасности приходится ограничивать при исследовании скважин сравнительно небольшой величиной, составляющей для полоний-бериллиевых источников нейтронов не свыше 10 кюри по полонию, а для источников гамма-квантов — не свыше 0,05 кюри. Скважинный ускоритель может быть включен на глубине скважины и поэтому безопасен при транспортировке и при подготовительной работе на скважине. Увеличение мощности ускорителя ограничивается только его конструкцией.

Увеличение мощности источников излучения позволит увеличить скорость измерений при радиоактивном каротаже за счет уменьшения статистического разброса их результатов. Это увеличение пропорционально корню квадратному из отношения мощностей источников при неизменной точности измерений. Мы не ошибемся, сказав, что усилия, затраченные на разработку скважинных ускорителей, окупятся увеличением скорости измерений при нейтронном каротаже и при исследованиях скважин методом наведенной радиоактивности.

Известно, что энергия гамма-квантов естественных и искусственно полученных радиоактивных веществ не превышает З Мэв. Энергия большинства нейтронов, излучаемых радий-бериллиевыми и полоний-бериллиевыми источниками, не превосходит 5 Мэв и лишь для очень немногих нейтронов превосходит 10 Мэв. С помощью ускорителей можно получать гамма-кванты и нейтроны значительно большей энергии.

Неоценимым преимуществом ускорителей является возможность получения моноэнергетического излучения, а также возможность управления процессом излучения, в частности получения импульсов излучения заданной длительности, формы, сложности и частоты повторения.

96 -

Отмеченные особенности скважинных ускорителей позволяют предпринять разработку новых способов радиоактивного каротажа, не осуществимых при использовании стационарных источников излучения, изготовляемых из радиоактивных веществ.

Рассмотрим некоторые из этих способов.

Применение генератора гамма-квантов с достаточно высокой энергией и интенсивностью излучения позволяет ставить вопрос о разработке гамма-нейтронного каротажа, при котором породы облучаются гамма-квантами и регистрируется интенсивность вызванного этим фотонейтронного излучения горных пород.

В таблице 1, составленной по данным [1, 2, 3, 4], приведены фотонейтронные характеристики дейтерия, бериллия и основных элементов, слагающих осадочные горные породы нефтяных и газовых месторождений и входящих в состав пластовых вод, обычно насыщающих эти породы.

Как видно из таблицы, наблюдается значительное различие между породообразующими элементами по величине сечения реакции ( $\gamma$ , n), что, по-видимому, может служить основанием для их селективного выделения в горных породах методом гамма-нейтронного каротажа. Особое внимание привлекают низкие пороговые энергии реакций D ( $\gamma$ , n) и Be ( $\gamma$ , n).

Использование реакции  $D(\gamma, n)$  представляется перспективным для выделения нефтеносных пластов в разрезе скважин по повышенному содержанию дейтерия в нефти (особенно в ее легких фракциях), в 2-3 раза превосходящему его содержание в пластовых водах [3, 5, 6, 7].

Для оценки возможности расчленения горных пород, по данным гамма-нейтронного каротажа, рассмотрим фотонейтронные свойства осадочных горных пород. Фотонейтронные свойства породы можно охарактеризовать макроскопическим эффективным сечением  $\sigma_m$  реакции  $\gamma, n$ , связанным с сечениями  $\sigma_i$  ядер атомов, входящих в состав породы, следующей зависимостью

$$\sigma_m = \sum_i n_i \sigma_i ,$$

где  $n_i$  — число ядер *i*-го сорта в 1 *см*<sup>3</sup> породы.

Вычисленные по этой формуле значения отношения  $\sigma_m$  породы к  $\sigma_m$  воды для различных горных пород и для различных энергий гамма-квантов показаны на фиг. 1. Значения  $\sigma_i$  были взяты для расчета из работ [2, 3, 4, 8, 9, 10]. На этой же фигуре нанесена зависимость отношения длин миграции нейтронов в горной породе и в воде, построенная по данным [11, 12]. Эта зависимость характеризует расчленение горных пород методами нейтронного каротажа.

Как видно из фиг. 1, имеет место значительная дифференциация горных пород по их фотонейтронным свойствам, превосходящая при некоторых значениях энергии гамма-квантов их дифференциацию по нейтронным свойствам. Особенно интересна зависимость дифференциации от энергии гамма-квантов, возможность изменения которой при проведении исследований обеспечит поэтому значительное увеличение разрешающей способности метода.

Так, например, при энергии гамма-излучения менее 4 — 6 *Мэв* будут регистрироваться лишь фотонейтроны из дейтерия и бериллия.

Рассмотрим теперь другие методы радиоактивного каротажа, осуществимые с применением скважинных ускорителей.

Применение генератора гамма-квантов при гамма-гамма-каротаже позволит увеличить глубинность исследования за счет увеличения энер-

7. Изв. ТПИ, т, 96,1,

гии гамма-квантов, излучаемых генератором. Кроме того, увеличение мощности источника позволит проводить исследования с зондами большого размера, при использовании которых обеспечивается большая чувствительность метода к изменениям плотности горных пород.



Фиг. 1. Фотонейтронные характеристики основных осадочных пород

$$A = \frac{\frac{6}{m} \frac{m \text{ породы}}{\delta m \text{ воды}}$$
при  $E_7 = 17,6 M 38,$ 
$$A = \frac{\frac{6}{m} \frac{m \text{ породы}}{\delta m \text{ воды}}$$
при  $E_7 = 20 M 38,$ 
$$A = \frac{\frac{6}{m} \frac{m \text{ породы}}{\delta m \text{ воды}}$$
при  $E_7 = 5 M 38,$ 
$$A = \frac{\frac{m \text{ породы}}{\delta m \text{ воды}}$$
для  $P_0 - Be$  источника нейтронов,

бт — макроскопическое сечение реакции у, n.

E<sub>1</sub> – энергия гамма-квантов,

 $M = \sqrt{2L^2 f + L^2 - d}$ лина миграции

L<sub>f</sub> – длина замедления быстрых нейтронов,

*L* — длина диффузии медленных нейтронов.

С помощью ускорителей можно получать электроны значительно большей энергии, чем излучаемые естественными и искусственными  $\beta$ -излучателями. Это дает основание для разработки нового метода "Электронного каротажа", при котором стенка скважины облучается потоком электронов и регистрируется возникающее при этом тормозное излучение, интенсивность которого будет, по-видимому, зависеть от литологической характеристики горных пород.

Применение стационарного генератора нейтронов большой мощности существенно облегчит исследование горных пород, пересеченных буровой скважиной, применяемыми в настоящее время методами наведенной радиоактивности долгоживужих элементов (например, методом наведенной активности по натрию). При высокой энергии генерируемых нейтронов (14 *Мэв*) может оказаться осуществимой регистрация наведенной активности алюминия, при активации которого так-

98

же образуется радиоактивный изотоп Na<sup>24</sup>. На ряду с этим представляет большой интерес разработка новых методов наведенной радиоактивности короткоживущих элементов осуществимых с импульсным генератором нейтронов, что может дать дополнительные данные о вещественном составе горных пород и насыщающих их флюидов. Так, при взаимодействии нейтронов энергии 14 Мэв с ядрами атомов горных пород могут образовываться радиоактивные изотопы азота и алюминия, возникающие в результате активации быстрыми нейтронами кислорода и кремния и имеющие периоды полураспада, соответственно равные 7,5 сек и 2,3 минуты. Это позволяет рассчитывать на использование скважинного генератора нейтронов для выделения в разрезе скважины пород, содержащих повышенное количество кислорода и кремния, в частности, песчаников. Результаты лабораторных работ [9] показывают, что наведенная нейтронами с энергией 14 Мэв активность значительно выше у образцов песчаников, чем у образцов известняков и глин.

Применение генератора нейтронов, работающего в импульсном режиме, является основанием для разработки новой методики нейтронного гамма-каротажа, при которой горные породы облучаются импульсами нейтронного излучения и регистрируется гамма-излучение, возникающее при первых неупругих соударениях нейтронов с ядрами атомов горных пород.

Можно также ставить вопрос о разработке новых методик нейтрон-нейтронного каротажа с импульсным генератором нейтронов.

При одной из них регистрация плотности медленных нейтронов осуществляется в промежутках между периодически следующими непродолжительными импульсами нейтронного излучения, причем промежуток времени между окончанием генерирования импульса и началом регистрации плотности нейтронов выбирается настолько большим, чтобы отмечать лишь те нейтроны, которые длительно мигрировали в горной породе. Таким путем можно рассчитывать увеличить глубинность исследования при нейтронном каротаже и уменьшить влияние скважины на его показания.

Другая новая методика нейтрон-нейтронного каротажа основана на регистрации изменений во времени плотности тепловых нейтронов на некотором расстоянии от ускорителя, генерирующего непродолжительные импульсы нейтронного излучения. Таким путем могут быть получены сведения о важных нейтронных параметрах горных пород, связанных с их литологическими свойствами.

Применение ускорителей ионов в качестве генераторов нейтронов рассмотрены в работе [14]. Представляет интерес оценить возможность использования для этого бетатрона с вольфрам-бериллиевой или вольфрам-дейтериевой мишенью. Это можно сделать исходя из следующих данных.

На фиг. 2, составленной по экспериментальным данным, опубликованным в работах [1, 2, 8, 9, 16], показана зависимость от энергии гамма-квантов выхода фотонейтронов из толстых мишеней, изготовленных из бериллия и дейтерия. Тормозное гамма-излучение бетатрона характеризуется непрерывным спектром [16]. На фиг. 3 показано, какая часть гамма-излучения бетатрона будет иметь энергию, превышающую пороговую реакцию  $\gamma$ , *n* для бериллия и дейтерия при различной максимальной энергии бетатрона. Расчетные данные, полученные для вольфрамовой мишени по данным работы [19], сопоставлены для контроля на этой фигуре с экспериментальными, полученными с золотой-мишенью [17].

С использованием данных, показанных на фигурах 2 и 3, вычисле-

99



Фиг. 2. Зависимость выхода N фотонейтронов в нейтрон сек на 1 гамма-квант энергии  $E_{\gamma}$ , на 1 г Ве и D для толстой мишени, находящейся на расстоянии. 1 с.и от источника гамма-квантов. I - D, 2 - Be



Фнг. 3. Зависимость от максимальной энергии  $E_{\text{ттах}}$  тормозного излучения содержания (k) в спектре тормозного гамма-излучения бетатрона гамма-квантов с энергией E больше пороговой ( $E_{nop}$ ) для бериллия и дейтерия.  $1 - E > E_{nop}$  для Be;  $2 - E > E_{nop}$  для D;











Фиг. 5. Спектр фотонейтронов от бериллия и дейтерня при использовании в качестве источника гамма-излучения бетатрона с макси-мальной энергией тормозного излучения  $E_{\text{max}}$ 1,2—Be; 3—4—D; 1—3— $E_{\text{max}}$ =5 Мэв; 2—4— $E_{\text{max}}$ —10 Мэв

на зависимость выхода фотонейтронов из толстых мишеней из дейтерия и бериллия под воздействием излучения бетатронов, имеющих различную максимальную энергию гамма-квантов (фиг. 4). Энергетический спектр фотонейтронов, вычисленный по данным [1, 2] для нескольких значений максимальной энергии гамма-квантов, показан на фиг. 5.

#### Таблица 1

Сим- вол эле- мента	Атом- ный вес	Горные породы, в состав которых входит элемент	Порог ре- акции ү, п (Мэв)	Энергия квантов ( <i>Мэв</i> ), со- ответст- вующ. максим. выходу фотонейт- ронов	Макси- мальное сечение реакции 7, п (милли- барны)
D	2	Все водоносные и нефтеносные породы	2,23	5	2,3
e	9	Глины, известняки скарповых зон	1,67	$ \begin{array}{c c} 1,71; 5,0 \\ 18,0 \end{array} $	1,0 1,5
С	12	Известняки и др. карбонатные породы	13,7	22,9	4,8 13,0
Ν	14	Пластовые воды	10,5	24.2	2,8
0	16	Все породы и пластовые воды	15,5	22,5	9,0
Na	23	Каменная соль, пластовые воды	12,05	18,0	11,0
Mg	$-24 \\ -25$	Доломиты	16,4 7,25	19,0	$9,0\\12,0$
Al	$\frac{26}{27}$	Глины, песчаники	11,15 12,75	18,0 19,6	25,0
Si	28 29	Пески, песчаники, глины	$\begin{array}{c}15,8\\8,45\end{array}$	20,9	21,0
S	$\begin{array}{c} 32\\ 34 \end{array}$	Доломиты, гипсы, пластовые воды	$\begin{array}{c}14,8\\10,35\end{array}$	$\begin{array}{c} 20,5\\17,0\end{array}$	13,0 3,0
Ce	35 37	Камениая соль, пластовые воды	$17,8 \\ 9,5$	19,0	5 17,6 <i>M</i> 35
K	39	Песчаники, пласты калийных солей, пластовые воды	13,2		
Ca	40	Известняки и другие карбонатные породы	15,9	19,5	2,7
Fe	54 55 56	Песчаники, сланцы	13,3 11,15 7,75	18,3	75,0

Фотонейтронные свойства дейтерия, бериллия и основных элементов, слагающих осадочные горные породы нефтяных и газовых месторождений и входящих в состав пластсвых вод.

Данные проведенных расчетов показывают, что даже при сравнительно небольшой максимальной энергии гамма-излучения бетатрона он может быть использован в качестве источника нейтронов. Результаты работ [18, 19] показывают, что имеет смысл использовать в мишенях для бетатрона до 200 г дейтерия или бериллия. Ограничившись вдвое меньшей величиной, получим, что при максимальной энергии гамма-излучения бетатрона 5 *Мэв* выход фотонейтронов на 1 *мка* тока на вольфрамовую мишень будет составлять для дейтерия 8.10<sup>10</sup> и для бериллия — 1.6.10<sup>10</sup>. Полагая, что ток на мишень бетатрона лежит в пределах 0,001 — 0,01 мка (19), получим, что выход фотонейтронов из дейтериевой мишени будет находиться в пределах  $10^8 \div 10^9$ нейтронов в секунду, а из бериллиевой мишени в пределах  $10^7 \div 10^9$ нейтронов в секунду.

Бетатрон может быть использован в качестве генератора нейтронов при лабораторных работах по нейтрон-нейтронному каротажу. При использовании для нейтронного гамма-каротажа его большим недостатком будет значительная интенсивность испускаемого им гамма излучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сегре Э. (редактор). Экспериментальная ядерная физика. т. І и ІІ, И Л, 1955.

2. Власов Н. А. Нейтроны. Гостехтеориздат, 1955.

3. Montalbetti R., Katz L., Goldenberg J. Photoneutron cross sections. Phys. Rev., 91, p. 659, 1953.

4. Hartly W. H., Stephens W. E., Winhold E. J. Cross sections for photoneutron emission induced by the lithium gamma - rays. Phys. Rev., 104, p. 178, 1956.

5. Филиппова Н. С. Изотопы водорода в нефти. ДАН СССР, 3, 29, 1, 1935.

6. Ранкама К. Изотопы в геологии. ИЛ, 1955.

7. Изотопы в геологии. Сборник статей, ИЛ, 1954.

8. Z eviger J. S. Sum rules for photodisintegration of the deuteron. Phys. Rev. **97**, p. 970, 1954.

9. Allen Z. Photodisintegration of deuteron. Phys. Rev., 98, p. 705, 1955.

10. McDaniel B. D., Walner R. L., Stearus M. B. Neutron yields from photodisintegration by gamma-rays from Lithium. Phys. Rev., 80, p. 801, 1956.

11. Кантор С. А. Основы теории нейтронного каротажа. Прикладная геофизика, вып. 13, Гостоптехиздат, 1955.

12. Булашевич Ю. П. Теория нейтронного каротажа, применительного к разведке нефтяных и угольных месторождений. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофизики, 12, 2, 1948.

13. Cald well R. L. Nuclear physics in petroleum exploration research. World petroleum, april, 1956.

14. Запорожец В. М., Филиппов Е. М. Использование ускорителей заряженных частиц для исследования скважин методами радиоактивного каротажа. Прикладная геофизика № 19, Гостоптехиздат, 1958.

15. Гусев Н. Г. Справочник по радиоактивным излучениям и защите. Медгиз, 1956.

16. Schiff L. J. Energy-angle distribution of thin target Bremsstrahlung. Phys. Rev., 83, № 2, 1951.

17. Starfeld N., Koch H. W. Differentiale cross section measurements of thin target Bremsstrahlung, produced by 2,7-to 9,7 Mev lest raus. Phys. Rev., 102, № 6, 1956.

18. Cockroft J. D., Duckworth J. C., Merrison A. W. High-energy electron accelerators as pulsed neutron sources. Nature, 163, № 4153, p. 869, 1949.

19. Hine G. I., Senftle E. F. Neutron yield from Be  $(\gamma, n)$  Be<sup>8</sup> reaction. Phys Rev., 80, p. 904. 1950.

20. Акимов Ю. М., Кононов Б. А., Соколов Л. С. О выводе электронного пучка из камеры бетатрона. Доклад на конференции по электронным ускорителям, Томск, 15—20 февраля 1958. 21. Запорожец В. М., Сулин В. В. Гамма-нейтронный каротаж, Доклад

на конференции по электронным ускорителям, Томск 15-20 февраля, 1958.

22. Запорожец В. М., Кантор С. А. Импульсный нейтронный каротаж. Доклад на конференции по электронным ускорителям, Томск, 15-20 февраля 1958.

23. Филиппов Е. М. Гамма — гамма-каротаж с генератором гамма-квантов, Доклад на конференции по электронным ускорителям. Томск, 15-20 февраля, 1958.