УДК 622.276

А. В. Гурьянов, Б. В. Иванов, О. А. Горбоконенко
ООО «ГеоСплит»
М. Ю. Климов
ООО «Газпромнефть-Заполярье»
А. В. Смирнов, А. Н. Воробьев
ООО «НПП Энергия»

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙТРОННО-ПОГЛОЩАЮЩЕГО ПРОППАНТА ДЛЯ ОЦЕНКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРЕЩИН ГРП

Изучены способы контроля качества гидроразрыва продуктивного пласта (ГРП) и закрепления трещины. Особое внимание обращено на контроль ГРП в горизонтальной скважине. Данная технология находит применение при добыче углеводородов из сланцевых пород.

Ключевые слова: гидроразрыв пласта, нейтронно-поглощающий маркированный проппант, оценка высоты трещины, импульс-нейтронные каротажи.

Введение

Гидроразрыв (ГРП) продуктивных пластов с целью интенсификации извлечения углеводородов, особенно из нетрадиционных коллекторов, то есть с низкой пористостью и проницаемостью, берет свое начало в конце сороковых годов. В России этот метод начал широко использоваться в начале девяностых годов прошлого века. Первоначально он применялся для стимулирования притоков из скважин старого фонда.

В условиях трудноизвлекаемых запасов ГРП является ключевой технологией, позволяющей вести эксплуатацию месторождений эффективно и рентабельно. За последние десятилетия техника и технологии ГРП шагнули далеко вперед. В настоящее время применяются передовые физико-химические составы и реагенты, проппанты, технологические подходы полевых операций и программные комплексы компьютерного моделирования трещины в продуктивном пласте.

Однако ГРП, как любая технология, не лишен проблем. Эти проблемы обусловлены недостатками технологических операций. На-

пример, при отсутствии достаточно надежной трещины образуется столб («козел») из проппанта в стволе скважины, препятствующий добыче углеводородов. Слишком полное проталкивание проппанта в трещину приводит к тому, что она схлопывается и не происходит увеличения притока продукта из пласта после гидроразрыва. Важно также соблюсти направление и длину трещины, чтобы она не доходила до водонасыщенных горизонтов.

Вышеназванные причины обусловили необходимость контроля ГРП геофизическими методами. Наиболее часто для этих целей применяется акустический метод (АК) в модификации волнового акустического каротажа (ВАК). Главными показателями, по которым определяют положение и размеры трещины ГРП, являются параметры поперечной волны. Однако и этот геофизический метод имеет свои ограничения, обусловленные отсутствием сцепления обсадной колонны и цементного камня в интервале перфорации, куда закачивается проппант. Поэтому весьма желательно иметь дополнительный независимый контроль наличия и геометрии трещины ГРП. Таким методом может стать импульсный нейтронный метод. О применении этого метода при условии использования меченого проппанта и пойдет далее речь.

Нейтронно-поглощающий проппант

Технология изготовления нейтронно-поглощающего проппанта (NA) заключается во внедрении в полимерное покрытие нейтронно-контрастных веществ, обладающих большим сечением захвата тепловых нейтронов, например, оксида гадолиния (рис. 1) [1, 2]. Гадолиний (Gd) – элемент с самым большим сечением захвата нейтронов среди всех элементов таблицы Менделеева. Сечения захвата тепловых нейтронов гадолинием – более 45 000 *барн*. Проведение геофизических исследований методом импульсного нейтронного каротажа до и после ГРП с применением проппанта, покрытого оксидом гадолиния, позволяет провести контроль интервалов ГРП, определить закрепленную высоту трещины в вертикальном стволе и зону инициации трещин в горизонтальном стволе, а также решить ряд других задач [2].

Применяемый нейтронно-контрастный материал не влияет на физические свойства проппанта, нерадиоактивен, безопасен и безвреден для окружающей среды. В табл. 1 представлены типовые характеристики нейтронно-поглощающего проппанта.

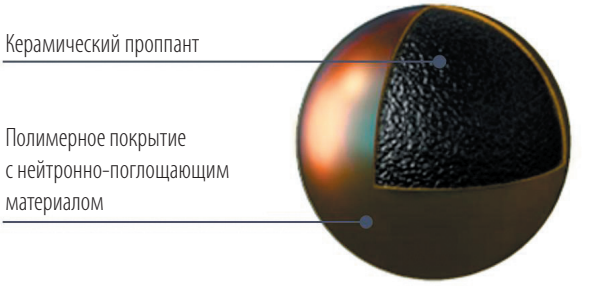

Рис. 1. Нейтронно-поглощающий покрытый полимером проппант GEOSPLIT NA

Таблица 1

Типовые характеристики нейтронно-поглощающего проппанта GEOSPLIT NA

№ п/п	Параметр	Фракция	
		16/20	20/40
1	Сопротивление раздавливанию при 7500 *psi*, %, не более	20	7
2	Сопротивление раздавливанию при 10 000 *psi*, %, не более	25	10
3	Кажущаяся плотность, *г/см*^{3}, не более	3,1	3,1
4	Насыпная плотность, *г/см*^{3}, не более	1,9	1,9
5	Массовая доля гранул основной фракции, %, не менее	86	86
6	Сферичность, условные единицы, не менее	0,7	0,7
7	Округлость, условные единицы, не менее	0,7	0,7
8	Толщина полимерного покрытия, *мкм*	15–20	15–20

Физические основы определения интервалов закрепления трещины ГРП нейтронно-поглощающим проппантом с помощью нейтронного каротажа

Применение импульсного нейтронного метода основано на облучении породы потоком быстрых нейтронов от импульсного нейтронного генератора и регистрации временных спектров принимаемых нейтронов, подвергшихся неупругому рассеянию и захвату на двух расстояниях от источника нейтронов. Импульсный режим работы нейтронного генератора позволяет проводить измерение скорости спада плотности потока тепловых нейтронов после окончания нейтронного импульса и через этот параметр выходить на такую характеристику среды, как макроскопическое сечение поглощения тепло-

вых нейтронов «Сигма» [5]. При этом можно разделить эффекты от ближней зоны (затрубное пространство) и дальней зоны (собственно пласт). Характеристика «Сигма» является наиболее чувствительной к наличию нейтронно-поглощающего проппанта. Наличие трещины, закрепленной проппантом, определяется по разнице замеров до и после ГРП. Закрепление трещины контрастным нейтронно-поглощающим проппантом приводит к увеличению «Сигмы» по сравнению с фоновым замером. Дифференциальные характеристики, разность скоростей счета между двумя детекторами (ближним и дальним), являются менее чувствительными, чем интегральные характеристики, измеренные на большой базе (излучатель – ближний детектор, излучатель – дальний детектор).

К приборам, способным обеспечить идентификацию нейтронно-поглощающего проппанта, относятся российские геофизические приборные комплексы импульсного нейтронного каротажа ООО «НПП Энергия» (рис. 2) [4], такие как ПИНК, АИМС и др. Данные приборные комплексы прошли сертификационные испытания и подтвердили эффективность работы с проппантом GEOSPLIT.

Рис. 2. Прибор импульсного нейтронного каротажа ПИНК-43 производства ООО «НПП Энергия» для идентификации нейтронно-поглощающего проппанта [4]

Стендовые испытания

Для оценки нейтронно-поглощающей способности проппанта GEOSPLIT были проведены испытания на одном из стендов ООО «НПП Энергия» (рис. 3). Они заключались в облучении потоком быстрых нейтронов образцов простого керамического и нейтронно-поглощающего проппанта (рис. 4). Целью испытаний являлась оценка разности скоростей счета нейтронов при наличии или отсутствии маркированного проппанта между источником и детектором нейтронов. В качестве геофизической аппаратуры использовался приборный комплекс LWD121-2ННК-ГГКЛП. В данном случае прибор оснащен детектором тепловых нейтронов на основе счетчика СНК-32/120-6,0/Л, а в качестве источника нейтронов использован плутоний-бериллиевый источник (активность – $4{,}8\times10^{10}$ *Бк*, поток – $1{,}96\times10^{6}$ *н/с*).

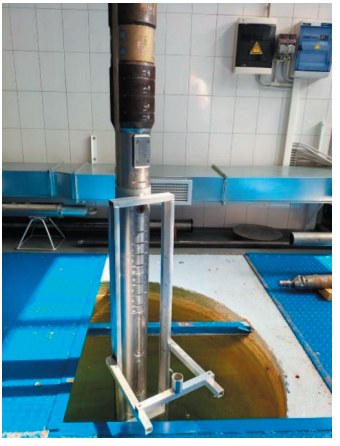

Рис. 3. Общий вид стенда испытаний ООО «НПП Энергия»

Рис. 4. Засыпка образцов проппантов в емкости, выполненные из тонколистовой (0,5 *мм*) жести. № 1 (справа) – керамический непокрытый проппант, № 2 (слева) – маркированный нейтронно-поглощающий проппант

Испытания заключались в следующем:

1) каждый из образцов проппанта был засыпан в специализированные емкости с внешними размерами 20×20×4 *см* и объемом 1,5 *л*;

2) проведен спуск и фиксация приборного комплекса LWD121-2ННК-ГГКЛП в стационарном баке, наполненном водой;

3) проведено измерение скорости счета тепловых нейтронов приборным комплексом LWD121-2ННК-ГГКЛП в воде. Измерения проводились в течение 10 *мин* с пятью усредненными замерами;

4) далее был смонтирован и зафиксирован образец № 1 (керамический непокрытый проппант) внутри бака между источником и детектором нейтронов (рис. 5). Проведено измерение скорости счета тепловых нейтронов приборным комплексом LWD121-2ННК-ГГКЛП в течение 10 *мин* с пятью усредненными замерами для данного образца;

5) аналогичным образом были проведены измерения для образца № 2 (маркированный нейтронно-поглощающий проппант).

Результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты стендовых испытаний проппантов GEOSPLIT на поглощение тепловых нейтронов

Параметр	Номер измерения					Среднее
	1	2	3	4	5	
Скорость счета тепловых нейтронов в воде, *имп/мин*	10 480	10 375	10 473	10 448	10 425	10 425
Скорость счета тепловых нейтронов на керамическом непокрытом проппанте (образец № 1), *имп/мин*	13 236	12 870	13 016	13 212	13 338	13 102
Скорость счета тепловых нейтронов на маркированном нейтронно-поглощающем проппанте (образец № 2), *имп/мин*	6 169	6 361	6 280	6 113	6 372	6 295

Средние зарегистрированные скорости счета тепловых нейтронов составили:

– в воде без проппанта – 10 425 *имп/мин*;

– на керамическом непокрытом проппанте – 13 102 *имп/мин*;

– на маркированном нейтронно-поглощающем проппанте – 6 295 *имп/мин*.

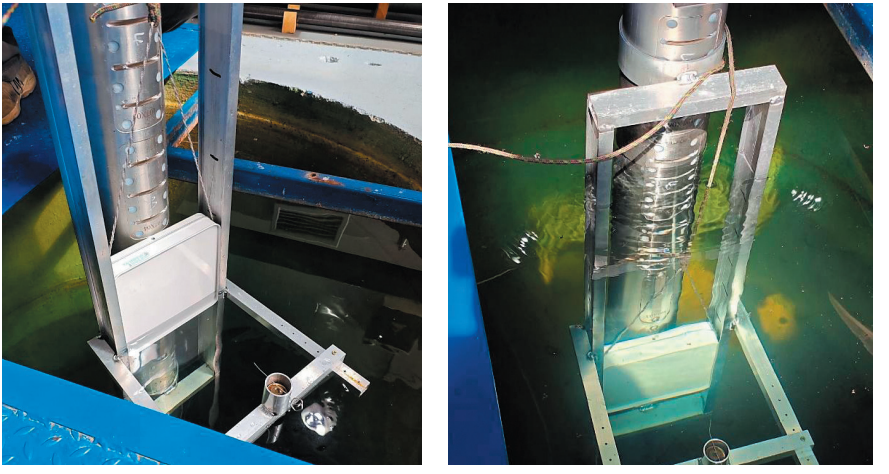

Рис. 5. Фиксирование специализированной емкости с образцами проппантов между источником и детектором тепловых нейтронов приборного комплекса LWD121-2ННК-ГГКЛП

Уменьшение скорости счета тепловых нейтронов на маркированном нейтронно-поглощающем проппанте составило 52% по сравнению с керамическим непокрытым проппантом. Таким образом, проппант, покрытый гадолинием, обладает повышенными поглощающими свойствами, поэтому его применение при гидроразрыве пласта позволяет использовать радиоактивные методы для контроля результатов гидроразрыва.

Оценки высоты трещин ГРП на Песцовом месторождении

Нейтронно-поглощающий проппант был применен на одной из наклонно-направленных скважин Песцового нефтегазоконденсатного месторождения ООО «Газпромнефть-Заполярье» (рис. 6). Скважина была пробурена на ачимовские отложения. В скважине был проведен многостадийный ГРП с применением проппанта, меченного гадолинием. Диагностическим методом идентификации трещин в скважине являлся импульсный нейтронный гамма-каротаж, который проводился до и после ГРП. Данные о проектируемой трещине приведены в табл. 3 и 4.

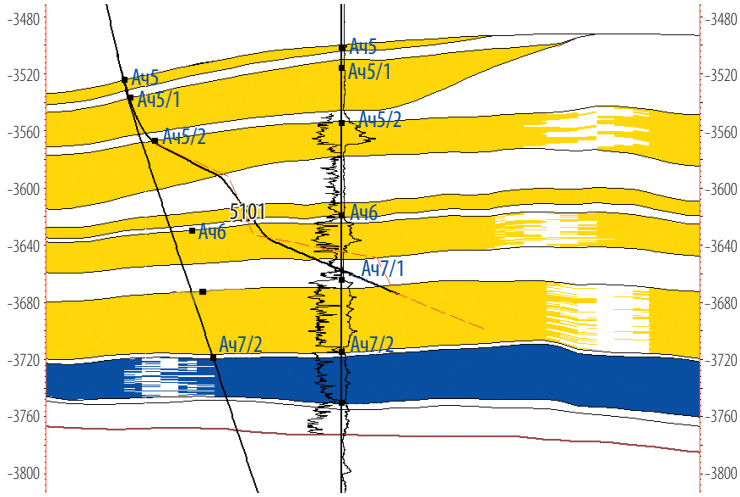

Рис. 6. Профиль наклонно-направленной скважины

Таблица 3

Общие данные о ГРП

Стадия ГРП № / пласт	Дата ГРП	Интервал перфорации, *м*	Общее количество проппанта в пласте, *т*	Количество NA-проппанта в пласте, *т*
1 / Ач7(2)	23–26.06.2022	4200,51–4201,58	30	25
2 / Ач7(1)	05–07.09.2022	4162,5–4167,0	75	60

Таблица 4

Проектные геометрические характеристики трещин ГРП

Стадия ГРП № / пласт	Интервал перфорации, *м*	Полудлина трещины (план / редизайн), *м*	Высота трещины (план / редизайн), *м*	Ширина трещины (план / редизайн), *мм*
1 / Ач7(2)	4200,51–4201,58	68,2 / 44,6	51,9 / 52,7	4,9 / 4,5
2 / Ач7(1)	4162,5–4167,0	48,8 / 64,5	54,2 / 80,7	9,0 / 5,1

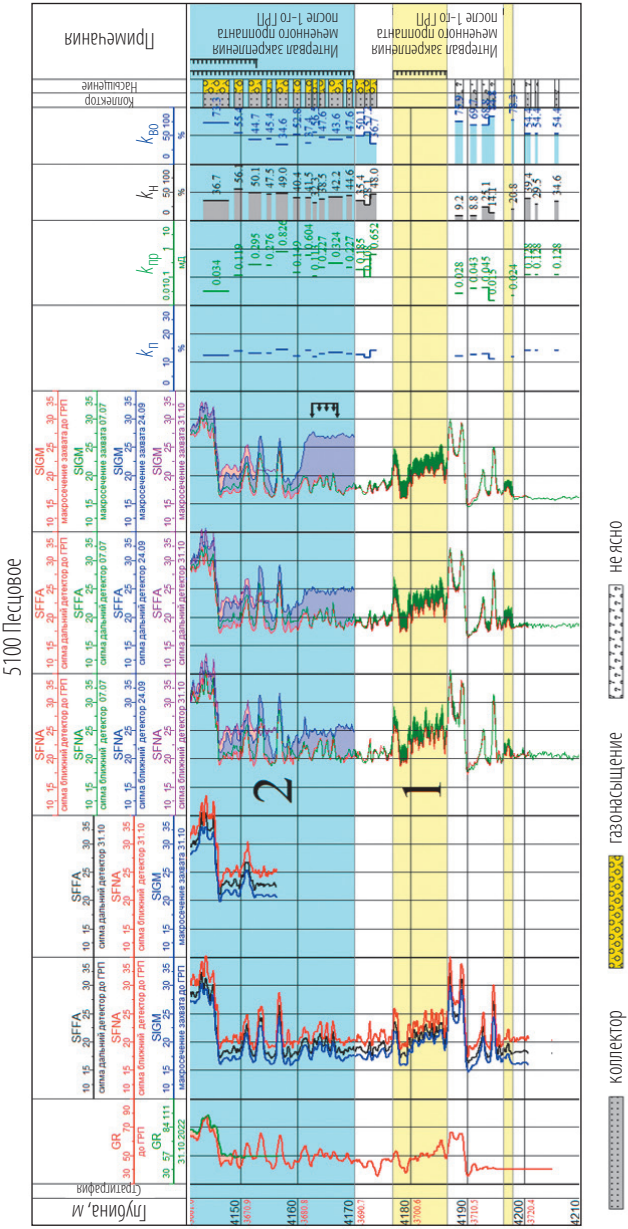

Рис. 7. Обобщенный геофизический планшет по определению интервалов и высоты закрепления трещин ГРП нейтронно-поглощающим проппантом

Определение интервалов и высоты закрепления трещины ГРП производилось по данным импульсного нейтронного гамма-каротажа.

На рис. 7 представлены кривые «Сигма» для ближнего (SFNA) и дальнего (SFFA) зондов, дифференциальные кривые «Сигма» (SIGM) до ГРП, после первого ГРП на пласт Ач7(2) и после второго ГРП на пласт Ач7(1).

На рис. 8 представлены кросс-плоты сопоставления кривых «Сигма» до и после проведения ГРП для каждой из стадий. Красным цветом выделены точки, которые относятся к интервалам, где произошло увеличение сечения захвата нейтронов после закачки проппанта GEOSPLIT, что демонстрирует достаточное количество вещества с высоким свойством захвата нейтронов в полимерной оболочке проппанта.

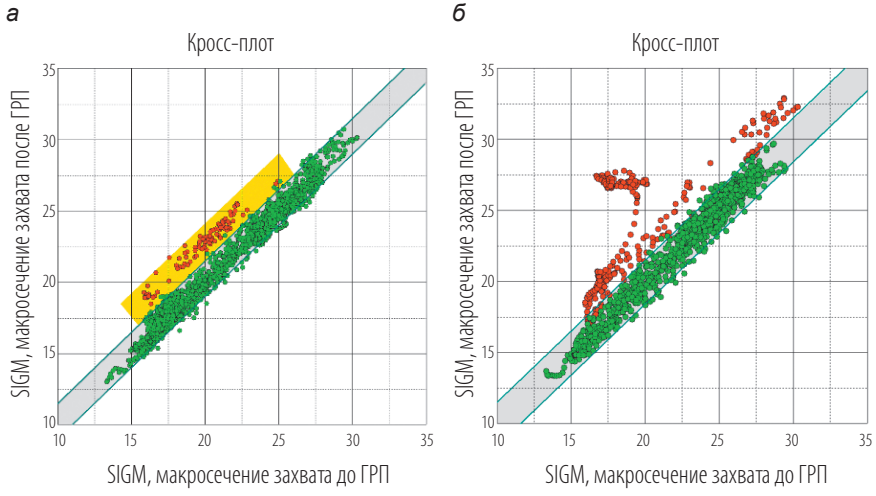

Рис. 8. Кросс-плоты сопоставления кривых Сигма до и после проведения ГРП для каждой из стадий: *а* – стадия № 1; *б* – стадия № 2

В результате интерпретации данных импульсного нейтронного гамма-каротажа, проведенного до и после ГРП, были определены интервалы закрепления трещин проппантом, представленные в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения интервалов закрепления трещин ГРП проппантом

Стадия ГРП № / пласт	Интервал перфорации, *м*	Интервал закрепления проппанта, *м*	Высота закрепления, *м*
1 / Ач7(2)	4200,51–4201,58	4174,0–4183,6	9,6
		4193,5–4195,2	1,7
2 / Ач7(1)	4162,5–4167,0	4140,9–4170,0	29,1

Заключение

Стендовые испытания и опытные работы в скважинах по применению проппанта, покрытого гадолинием, показали возможность контроля трещин гидроразрыва радиоактивными методами, в частности, импульсными методами ННК и НГК.

Полученные результаты дают основание для применения технологии в условиях высокой геологической неопределенности, сложнопостроенных коллекторов и других осложненных условий, когда требуется особое внимание к созданию трещин ГРП заданной геометрии для обеспечения эффективной разработки трудноизвлекаемых запасов углеводородов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Арефьев С. В., Малявко Е. А., Горбоконенко О. А., Хамидуллин В. В. и др.* Разработка методики обоснования количества маркированного проппанта для мониторинга профиля и состава притока в добывающих скважинах с МГРП Западной Сибири // Бурение и нефть. 2025. № 7–8. С. 12–17.

2. *Коротков К. В., Черменский В. Г., Меженская Т. Е.* Имиджи в методе импульсного нейтронного каротажа // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2017. Вып. 4 (274). С. 3–23.

3. *Овчинников К. Н., Малявко Е. А., Буянов А. В., Кашапов Д. В.* Моделирование распространения маркированного проппанта в трещине гидравлического разрыва пласта // Бурение и нефть. 2020. № 10. С. 20–26.

4. Прибор импульсного нейтронного каротажа ПИНК-43. Руководство по эксплуатации. АРЕВ 2.807.055 РЭ. Тверь: ООО «НПП ЭНЕРГИЯ». 2016.

5. *Шимелевич Ю. С., Кантор С. А., Школьников А. С. и др.* Физические основы импульсных нейтронных методов исследования скважин. М.: Недра, 1976.

Рецензент доктор техн. наук, профессор Е. П. Боголюбов

Поступление рукописи в редакцию 04.09.25 г., принятие в печать 06.10.25 г.