

**О НЕКОТОРЫХ ФАКТОРАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГРП
С ЗАКАЧКОЙ БОЛЬШИХ КОЛИЧЕСТВ ПЕСКА****ABOUT SOME FACTORS DETERMINING THE EFFICIENCY
OF FHF WITH INJECTION OF LARGE AMOUNTS OF SAND****В. Г. Григулецкий**

V. G. Gryguletski

*РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, г. Москва**Ключевые слова: гидроразрыв пласта; перфорация скважин; продуктивность скважин
Key words: formation hydraulic fracturing; borehole perforation; well productivity*

В последние 30–40 лет на нефтяных и газовых месторождениях США, Канады [1–4], России [5] и др. стран широко используется направленный многостадийный гидравлический разрыв пласта (ГРП) в различных горно-геологических условиях. При этом в процессе ГРП производят закачку больших объемов песка (500–1 000 т).

В табл. 1 представлены основные технико-технологические результаты ГРП на нефтегазовых месторождениях округа Мак-Маллен, штат Техас (США), в скважинах глубиной 2 987 м (и более) с закачкой больших количеств песка по данным Дж. Э. Смита [4].

Гидравлический разрыв пласта с закачкой больших количеств песка позволяет, во-первых, произвести заполнение большого объема трещин (фактически сформировать искусственный высокопроницаемый пласт в низкопроницаемых породах) в прискважинном пространстве. Во-вторых, большое количество песка в прискважинном пространстве обеспечивает меньшее загрязнение стенок добывающей скважины. В-третьих, большое количество песка обеспечивает высокую пропускную способность для углеводородов (нефть, газ) за счет увеличения площади трещин гидроразрыва. Кроме того, большие количества песка при гидравлическом разрыве пласта позволяют получить повышенную продуктивность скважин, увеличить извлекаемые запасы нефти и газа.

Дж. Э. Смит [4] специально отмечает, что «гидроразрыв с закачкой больших количеств песка — это интенсифицирующая операция, в которой используется повышенная несущая способность жидкостей на основе современных полимеров с поперечными связями».

И. Р. Дияшев, А. А. Смаровозов, М. Р. Гиллард опубликовали [5] важную для теории и практики технологии ГРП статью по анализу результатов проведения «Супер-ГРП» на скв. 303 Ярайнерского месторождения ОАО «Сибнефть-ННГ», который был выполнен 17.09.2000 г.

На основе геолого-математического и гидродинамического моделирования было установлено, что для условий ачимовских отложений Ярайнерского месторождения целесообразно провести массивированный и глубокопроникающий ГРП с массой 100 т (ранее такие объемы песка не использовались при ГРП на месторождениях Западной Сибири).

Таблица 1

Результаты операций по гидроразрыву пласта с закачкой больших количеств песка на месторождении (песчаник олмос), глубина 2 987 м, округ Мак-Маллен, штат Техас

Тип скважины	Тип жидкости разрыва	Объем жидкости для обработки, м ³	Количество расклинивающего материала, т	Концентрация расклинивающего материала, кг/м ³		Средний темп закачки, м ³ /мин	Дебит нефти м ³ /сут (до/после обработки)	Дебит газа тыс. м ³ /сут (до/после обработки)	Добыча нефти, м ³	Время добычи нефти, сут	Добыча газа, млн м ³	Время добычи газа, сут
				средняя	максимальная							
Нефтяная	Нефте-водная эмульсия	125	22,7	359	479	Неизвестен	Перелив 4,1	0 0,28	310	180	22,7	180
Нефтяная*	Загущенный газовый конденсат	151	31,7	359	479	2,1	Сваби-рование 3,2	0 0,28	403	180	36,8	180
Нефтяная**	Загущенное дизтопливо	670	680	1438	1797	2,0	1,6–2,2 40,5	0 10,11	5088	180	1274,3	180
Нефтяная	Загущенное дизтопливо	454	183	899	1138	2,0	Сваби-рование 17,5	0 2,12	2590	180	314,3	180
Газовая	Загущенное дизтопливо	568	370	1198	2037	2,7	0,3 21,3	4,25 31,15	1630	180	5040,3	180
Нефтяная	Загущенное дизтопливо	780	567	1677	1737	2,0	Сваби-рование 28,6	0 4,25	3752	180	557,8	180
Нефтяная	Загущенная вода	681	703	1030	1773	2,0	Незначительный приток 18,3	Незначительный приток 5,66	1162	66	314,3	65
Нефтяная	Загущенная вода	685	538	779	1857	2,0	1,9 12,7	Незначительный приток 7,36	671	60	430,4	60
Нефтяная	Загущенная вода	719	712	994	1737	2,0	1,6 20,7	0,28 4,54	1014	56	249,2	54
Нефтяная	Загущенная вода	712	703	982	1713	2,0	1,7 21,5	Незначительный приток 2,55	1056	49	113,3	45
Газовая	Загущенная вода	757	748	994	1917	2,0	Незначительный приток 11,1	0,57 31,5	305	36	569,2	36
В среднем		572	478	970	1509	2,1	1,1 18,1	0,45 9,03	14		6824,4	

* Первичная обработка

** Повторная обработка

С целью получения полной и подробной геолого-геофизической информации об интервале проведения ГРП было принято решение о проведении мини-ГРП со спуском в скважину датчика давления и размещенного над интервалом перфорации для записи забойного давления и корректировки коэффициентов трения для колонны НКТ при прокачке раствора.

Мини-ГРП проведено с применением 2%-ного солевого раствора KCl объемом 18 м³.

«После нагнетания солевого раствора закачку остановили, давая возможность раствору профильтроваться в пласт, а трещине закрыться.

Следующим этапом было проведение калибрационного нагнетательного теста, перед которым солевой раствор в НКТ был замещен жидкостью ГРП (YF140) плотностью 1,01 кг/м³. Затем в пласт закачали 25 м³ жидкости ГРП (без проппанта) для последующей оценки характера распространения трещины в пласте (геометрия трещины) и оценки коэффициента фильтрации рабочей жидкости в пласт.

Результаты интерпретации данных мини-ГРП подтвердили большую часть первоначально сделанных допущений и уточнили другие необходимые параметры, которые на начальной стадии разработки дизайна были получены из существующего каротажного материала и изначально требовали корректировки.

Было выявлено, что основной пласт состоит из трех подзон, отделяемых друг от друга заглинизированными прослоями» [5].

В процессе мини-ГРП определили давление закрытия трещин ГРП — 34,7 МПа, что соответствует градиенту ГРП около 13 кПа/м. Кроме того, определена возможная максимальная высота трещин ГРП — 22 м, модуль Юнга пород продуктивного пласта оказался фактически равным 6,105 кПа, а коэффициент фильтрации жидкости ГРП в пористую среду оказался равным $3,6 \cdot 10^{-3}$ фут/(мин)^{0,5} и, наконец, определен объем буферной жидкости при проведении основного супер-ГРП в 49 м³.

Полученные данные при проведении мини-ГРП дали ценную информацию, которую использовали при дальнейшей работе.

При проведении основного ГРП в продуктивный пласт было закачено 223,4 м³ рабочей жидкости, в трещину ГРП — 85 580 кг проппанта. Среднее рабочее давление закачки на поверхности составило 20,3 МПа.

Основные параметры трещины ГРП приведены ниже, а распределение основных параметров по длине трещины дано в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры трещины при супер-ГРП по данным работы [5]

Длина трещины, м	Ширина трещины, мм	Закрепленная высота трещины, м	Концентрация		Проводимость трещины, мкм ²
			проппанта, фунт/фут ³	геля в трещине, кг/м ³	
0,0–26,7	10,3	25,2	3,64	66	1,358
26,7–53,3	9,8	23,6	3,45	67	1,257
53,3–80,0	9,9	21,9	3,50	64	1,275
80,0–106,7	10,2	18,5	3,58	153	1,303

Из данных табл. 2 (столбцы 2, 3) видно, что параметры трещины (ширина, закрепленная высота) определяют ее не как «правильную окружность», или «правильный эллипс», а то, что «реальная трещина ГРП представляет собой «неправильный («рваный») прямоугольник», что подтверждается специальными лабораторными и промышленными измерениями (Дж. Э. Смит).

Анализ эксплуатации скважины после проведения супер-ГРП показал следующее: фактическая область дренирования оказалась больше расчетной, поэтому «...фактические результаты несколько превзошли прогноз» [5]. Ниже в табл. 3 представлены основные фактические и расчетные технико-экономические показатели супер-ГРП из статьи [5].

Таблица 3

Основные расчетные технико-экономические показатели внедрения ГРП на скважинах Ярайнерского нефтяного месторождения по данным авторов статьи [5]

Экономические параметры	ГРП-100 начальный прогноз	Прогноз на 3 года по фактической работе за первые 4 мес
Дата начала проекта	06.01.00 г.	10.01.00 г.
Накопленная добыча нефти,	173630 (27608)	198289 (31530)
Накопленная добыча газа,	440354 (12469)	445304 (12610)
Накопленная добыча воды, м ³ (баррель в ст. усл.)	2729 (17165)	4729 (29743)
Общая выручка, долл. США	977923	1176940
Общие эксплуатационные расходы, долл. США	132258	87360
Инвестиции, долл. США	645000	645000
Чистая дисконтированная стоимость, долл. США	68431	325670
Внутренняя норма прибыли, % / год	36,205	132,968
Срок окупаемости, мес.	19	7
Отношение ЧДС к инвестициям	0,1	0,5
Риск потенциальных убытков, долл. США	-\$548301	-\$517185

В процессе гидравлического разрыва пласта с закачкой большого количества песка обычно закачивается пульпа с концентрациями песка 1 440–1 680 кг/м³, а при необходимости концентрация может достигать 2 400 кг/м³.

Трещина, заполненная большим объемом расклинивающего материала, характеризуется высокой проводимостью [4]. Кроме существенных экономических показателей, процесс гидравлического разрыва пласта с закачкой больших количеств песка имеет важные технико-технологические особенности, которые необходимо учитывать при проектировании и практической реализации.

Следует отметить, что впервые теоретическое изучение многих вопросов гидравлического разрыва нефтеносных пластов выполнено в работах С. А. Христиановича, Г. И. Баренблатта, Ю. П. Желтова [6–10].

Именно в работах [6–10] теоретически обоснована возможность образования вертикальных и горизонтальных трещин большой протяженности (длины) при гидравлическом разрыве пласта.

«... Горизонтальная трещина имеет дискообразную форму». Часто считают, что она располагается в одной горизонтальной плоскости, но это не обязательно. Имея круговую форму в плане, горизонтальная трещина может иметь сложную пространственную форму.

Вертикальные трещины в проекции на вертикальную плоскость имеют, по-видимому, вид прямоугольника, одна из сторон которого лежит на поверхности скважины. Однако вертикальные трещины не обязательно должны располагаться строго в одной вертикальной плоскости, они также могут иметь сложную пространственную форму. Характерным для вертикальной трещины является образование за счет деформаций ее стенок в горизонтальной плоскости, перпендикулярно направлению радиуса, соединяющего элемент поверхности трещины с осью скважины» [9].

Дж. Э. Смит [11] наиболее полно описал основные факторы и проблемы, влияющие на эффективность гидравлического разрыва пласта.

Среди важных факторов, определяющих успешность гидроразрыва пласта, в статье указана «извилистость» фильтрационных каналов, определяющаяся «...поведением твердых частиц в жидкости-носителе» [11].

По мнению Дж. Э. Смита, в реальных условиях «...очень трудно составить математическое описание поведения твердых частиц в жидкости-носителе.

Сложность моделей, описывающих течение суспензий в перфорационных и фильтрационных каналах, имеющих реальную конфигурацию, затрудняет их использование без принятия упрощающих допущений» [11]. На рис. 1 показана экспериментальная траектория движения расклинивающего материала (песка), полученная в лабораторных условиях.

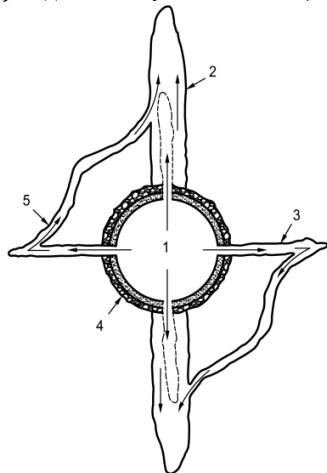


Рис. 1. Опытная траектория трещины гидравлического разрыва пласта (из статьи Дж. Э. Смита [11])

Можно согласиться с автором статьи, что результаты лабораторных экспериментов «...не могут быть применены для конкретных конфигураций указанных каналов при разработке нефтяных и газовых месторождений», потому что «...исследования, в которых изучали траектории движения частиц, проводили в упрощенных условиях» [11].

В статье [11] особенно подробно описаны особенности транспортировки частиц жидкости-носителя через перфорационные отверстия и их оседания в стволе скважины ниже интервала перфорации.

Опытами установлено, что оседание частиц жидкости-носителя определяется в основном от относительных значений силы инерции твердых частиц и сопротивления течению флюида.

Сила инерции способствует оседа-

нию частиц расклинивающего материала на забой скважины и препятствует их поступлению в перфорационные отверстия. За счет сопротивления течению твердые частицы движутся в направлении течения.

Высокие вязкости и скорости течения способствуют минимизации силы инерции частиц расклинивающего материала и максимизации сопротивления течению жидкости [11]. Когда частицы расклинивающего материала переносятся из обсадной колонны в перфорационные каналы в процессе осуществления гидроразрыва пласта, за счет сил инерции и гравитации происходит увеличение концентрации расклинивающего материала в интервале ниже перфорационных отверстий. Частицы расклинивающего материала могут образовывать мостовые перемычки у входа в перфорационный канал.

Жидкость-носитель с высокой концентрацией песка может испытывать значительные сопротивления течению через перфорационные отверстия, и расклинивающий материал начнет отлагаться в обсадной колонне, пока не будет достигнута равновесная скорость течения, после чего эта жидкость-носитель с высокой концентрацией песка сможет поступать в перфорационные каналы.

При выполнении гидравлического разрыва пласта с закачкой больших количеств песка эффект абразивного разрушения перфорационных отверстий играет большое значение.

Известно [1–4], что при гидравлическом разрыве пласта с закачкой больших количеств песка «...средняя концентрация расклинивающего материала нередко варьируется от 600 кг/м^3 до 960 кг/м^3 , причем в начале концентрация этого материала составляет примерно 120 кг/м^3 , а к концу обработки она возрастает до $1\,700\text{--}1\,900 \text{ кг/м}^3$ » [1].

В первых промысловых применениях технологии ГРП с закачкой больших объемов песка (1976 г.) на месторождении Саут-Бланко шт. Нью-Мексико в двух скважинах при глубине 1 500–1 800 м провели шесть обработок [1].

Все обработки были довольно одинаковы и обычно предусматривали закачку жидкости разрыва в объеме 450 м^3 на основе полимера с поперечными связями, в том числе 38 м^3 предварительного буфера и 76 м^3 основного буфера, а также 341 м^3 жидкости-носителя с использованием в качестве загустителя гуаровой смолы в концентрации $4,8 \text{ кг/м}^3$, понизителя показателя фильтрации (реагента AdomiteAqua) в концентрации $3,6 \text{ кг/м}^3$, титанатного реагента для образования поперечных связей в полимере с объемной долей $0,4 \text{ л/м}^3$, расклинивающего материала (песка из пласта брейди фракции $0,42\text{--}0,84 \text{ мм}$) в количестве 122 т при минимальной концентрации 120 кг/м^3 и максимальной концентрации 960 кг/м^3 (средняя концентрация песка 360 кг/м^3). Минимальная, максимальная и средняя объемные скорости закачки составляли соответственно $3,2 \text{ м}^3/\text{мин}$; $9,6 \text{ м}^3/\text{мин}$; $8 \text{ м}^3/\text{мин}$. Обработки с закачкой больших количеств песка были проведены практически без осложнений [1].

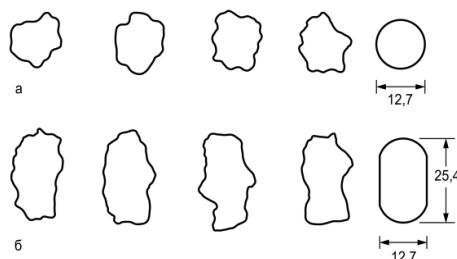
При прокачке больших количеств песка в песчано-жидкой смеси в скважину происходит абразивное разрушение перфорационных отверстий в колонне труб из-за высокой абразивной способности песка. Абразивный износ (точнее, разрушение) перфорационных отверстий определяется концентрацией песка в смеси, скоростью закачки технологической жидкости, общим временем прокачки раствора, формой и размерами обсадной трубы и песка, физико-механическими свойствами песка и материала обсадной (эксплуатационной) трубы.

Дж. Э. Смит, отмечает, что после проведения гидроразрыва пласта «...при одной и той же ширине перфорационные отверстия имели вдвое большую высоту». На рис. 2 показаны фактические формы перфорационных отверстий до (верхний ряд) и после (нижний ряд) проведения гидроразрыва пласта при начальной «правильной» круговой форме перфоратора диаметром 12,7 мм по данным Дж. Э. Смита [11].

На рис. 2 видно, что, как правило, «реальная форма» перфорационных отверстий непосредственно после проведения перфорации колонны труб не является «правильной» круговой. После прокачки большого объема песчано-жидкой смеси через перфорационные отверстия их форма изменяется значительно за счет высокой абразивной способности песка и представляет в основном не правильную круговую форму, а «рванную прямоугольно-эллиптическую форму» (см. рис. 2). Такая форма объясняется в основном анизотропией напряженного состояния труб при абразивном разрушении:

нормальные и касательные напряжения в круглой трубе значительно отличаются по форме от таких же напряжений в плоской пластинке [12, 13].

Рис. 2. Эрозия входного перфорационного отверстия под воздействием раскливающего материала (песка):
а — форма перфорационных отверстий до гидроразрыва пласта; б — форма перфорационных отверстий после гидроразрыва пласта



Большое количество песка, высокие скорости прокачки и абразивная способность технологических жидкостей в значительной степени способствуют разрушению круглой формы перфорационных отверстий при проведении ГРП.

Изучение этого явления весьма важно для технологии гидравлического разрыва пласта, особенно при закачке больших количеств песка.

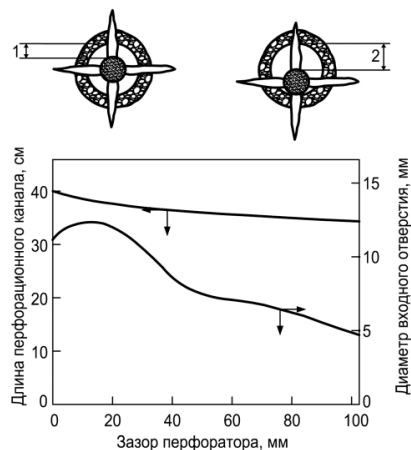
Разрушение круглой формы перфорационных отверстий происходит и за счет эксцентричного расположения кумулятивного перфоратора внутри обсадной колонны труб. Дж. Э. Смит [11] специально отмечает необходимость центрирования перфораторов в стволе скважины.

При использовании кумулятивных зарядов существует оптимальный зазор, при котором обеспечивается получение требуемого диаметра входного отверстия и глубины проникновения в пласт.

Зависимость между зазором перфоратора, диаметром входного отверстия и глубиной проникновения в пласт — сложная функция диаметра обсадной колонны, марки стали, прочности цементного камня и пластовой породы, типа скважинного флюида, давления и температуры.

На рис. 3 иллюстрируется влияние положения и зазора перфоратора на диаметр входного отверстия и длину перфорационного канала при использовании кумулятивного перфоратора с диаметром кожуха 85,7 мм и смещением заряда на 90° при простреле 177,8 мм обсадной колонны (трубы марки J-55, линейная плотность — 34,2 кг/м)» [11]. Из рис. 3 видно, что оптимальный зазор перфоратора примерно 13 мм, при этом диаметр входного отверстия составляет приблизительно 12 мм, а длина перфорационного канала — 38 мм.

Рис. 3. Влияние зазора перфоратора на диаметр входного отверстия и длину перфорационного канала (85,7 мм перфоратор используется для прострела 177,8 мм обсадной колонны — внутренний диаметр 161,7 мм, трубы марки J-55 линейной плотностью 34,2 кг/м):
1 — зазор перфоратора 38,1 мм;
2 — зазор перфоратора 76,2 мм



В наихудших условиях эксцентричного положения перфоратора максимальный зазор между кумулятивным зарядом и стенкой обсадной трубы равен 76,2 мм.

При таком зазоре диаметр входного отверстия составляет 6,4 мм, а длина перфорационного канала — приблизительно 36 см.

За счет эксцентричного расположения перфоратора зазор заряда может быть равен 30,4 мм и 0 мм; при этом диаметр входного отверстия и длина перфорационного канала будут равны 9,9 мм и 36 см, 10,9 мм и 38 см соответственно» [11].

Промысловыми и лабораторными исследованиями установлено [1–5,11], что в целом эффективность гидравлического разрыва пласта при закачке больших количеств песка зависит от «эффективности переноса песка в трещинах ГРП».

Для характеристики «эффекта переноса» в американской технической литературе используется [11] «...отношение массы расклинивающего материала (Q_p), прошедшего через перфорационные отверстия, к общей массе расклинивающего материала, закачанного в скважину (Q_i):

$$E_i = \frac{Q_p}{Q_i}.$$

Величина «эффекта переноса» (E_i) зависит от общего расхода жидкости-носителя, размера диаметра и концентрации песка.

На рис. 4 представлены опытные кривые зависимости «эффекта переноса» от расхода, размера и концентрации песка из статьи [11] для фракционных составов песка.

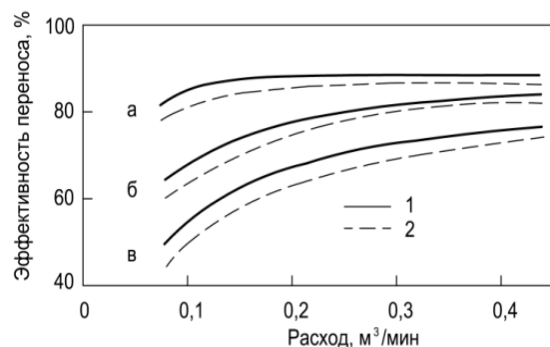


Рис. 4. Влияние расхода, размера и концентрации песка на эффективность его переноса:
фракция песка:
а — 0,177–0,42 мм;
б — 0,42–0,84 мм;
в — 0,84–2,00 мм;
концентрация песка в жидкости-носителе:
1 — 120 кг/м³; 2 — 1200 кг/м³

На рис. 4 видно, что «эффективность переноса песка повышается с увеличением расхода и приближается к некоторому максимальному значению» [11].

Эффективность переноса повышается также с уменьшением крупности частиц песка: для песка фракции 0,177–0,42 мм она выше, чем для песка фракции 0,42–0,84 мм и тем более 0,84–2,0 мм.

Эффективность переноса расклинивающего материала снижается с увеличением концентрации песка в жидкости-носителе.

Для всех рассмотренных фракций песка каждая кривая, полученная при низкой концентрации песка (120 кг/м³), располагается несколько выше соответствующей кривой для высокой концентрации песка (1200 кг/м³)» [11].

Важное влияние на процесс гидравлического разрыва пласта оказывает геометрическая форма частиц песка: *сферичность и окатанность*.

Сферичность расклинивающего материала определяется отношением объема частицы расклинивающего материала (V_{pr}) к объему описанной сферы вокруг этой частицы (V_{sph}):

$$S_{ph} = \frac{V}{V_{sph}}.$$

Окатанность расклинивающего материала определяется отношением среднего радиуса по углам и граням частиц (r_{pr}) к максимальному радиусу вписанной окружности (r_{max}):

$$R = \frac{r}{r_{max}}.$$

В табл. 4 приведены некоторые значения сферичности и окатанности зерен песка для визуальной приближенной оценки этих показателей.

Таблица 4

Рекомендуемые диаметры перфорационных отверстий

Фракция расклинивающего песка, мм	Максимальный диаметр частиц, мм	Отношение диаметров	Минимальный диаметр перфорационного отверстия, мм
1,68–3,36	3,36	6,0	20,07
1,68–2,38	2,38	6,0	14,22
1,19–2,38	2,38	6,0	14,22
0,84–2,00	2,00	6,0	11,94
0,59–2,00	2,00	6,0	11,94
0,84–1,68*	1,68	6,0	10,16
0,84–1,19*	1,19	6,0	7,11
0,59–1,19	1,19	6,0	7,11
0,42–0,84*	0,84	6,0	5,08

* Фракция песка, предназначенная для использования в качестве расклинивающего материала средней и высокой прочности.

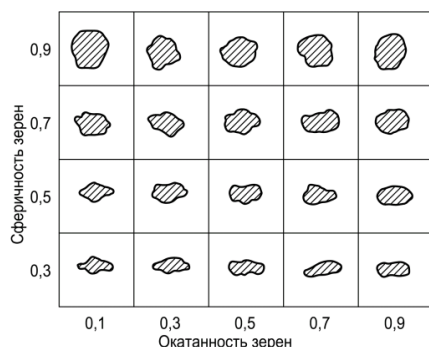
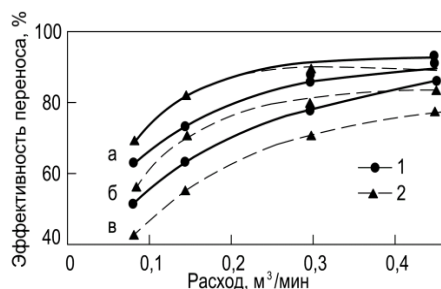


Рис. 5. Карта для визуальной оценки сферичности и окатанности расклинивающего материала

отверстий и, естественно, способствует возникновению технологических проблем при проведении ГРП с закачкой больших количеств песка.

На рис. 6 приведены опытные значения «эффекта переноса» песка (расклинивающего материала) при проведении ГРП в зависимости от его концентрации в жидкости-носителе (для частного случая концентрации 600 кг/м³) для двух сортов песка.

Рис. 6. Влияние сферичности частиц на эффективность переноса расклинивающего материала при его концентрации в жидкости-носителе 600 кг/м³; фракция песка: а — 0,177–0,42 мм; б — 0,42–0,84 мм; в — 0,84–2,00 мм; 1 — оттавский песок; 2 — неокатанный песок



Из данных, представленных на рис. 6, видно, во-первых, существенное влияние сферичности и окатанности песка на «эффект переноса», особенно при малых расходах закачки жидкости-носителя. Во-вторых, что особенно важно при проектировании ГРП и практической реализации, «эффективность переноса» увеличивается с уменьшением

размеров частиц песка и уменьшается с увеличением концентрации песка в жидкостиносителе.

На рис. 7 показана опытная зависимость, характеризующая эффект закупоривания перфорационных отверстий песком с применением различных жидкостей-носителей.

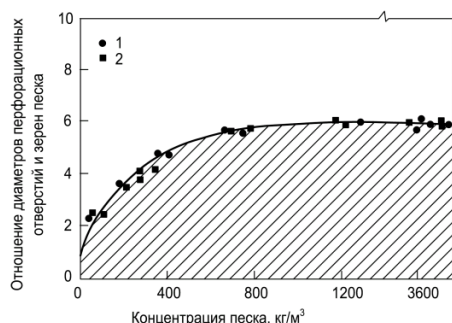


Рис. 7. Оценка эффекта закупоривания перфорационных отверстий песком, используемым в качестве расклинивающего материала (заштрихована область проявления этого эффекта): 1 — вода; 2 — раствор гидроэтилцеллюлозы вязкостью 100 мПа·с

Дж. Э. Смит [11] специально отмечает, что «...в начальный период закачки некоторое количество расклинивающего материала проходило, минуя перфорационные отверстия, и скапливалось на забое в виде песчаного столба. По мере продолжения закачки высота этого столба повышалась, пока не достигался равновесный уровень. Нередко равновесный уровень находился выше нижнего перфорационного отверстия, и его положение зависело от общей объемной скорости закачки».

В табл. 5 даны значения минимального диаметра перфорационных отверстий, при которых не происходит образования песчаных перемычек, для различных значений концентрации песка и диаметра его зерен [11].

Таблица 5

Минимальный диаметр перфорационных отверстий, необходимый для недопущения их закупоривания в зависимости от фракции песка, мм [11]

Концентрация песка, кг/м ³	Отношение диаметров	Фракции песка, мм				
		1,19–2,38	0,84–1,68	0,42–0,84	0,21–0,42	0,105–0,21
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
60	2,25	5,33	3,81	1,78	1,02	0,51
120	2,90	6,86	4,83	2,54	1,27	0,51
240	3,85	9,14	6,35	3,30	1,52	0,76
360	4,65	11,18	7,87	3,81	2,03	1,02
480	5,20	12,49	8,64	4,32	2,29	1,02
600	5,45	12,95	9,14	4,57	2,29	1,27
720	5,65	13,46	9,40	4,83	2,29	1,27
840	5,75	13,72	9,65	4,83	2,29	1,27
960	5,85	13,97	9,91	4,83	2,54	1,27
1080	5,90	13,97	9,91	5,08	2,54	1,27
1200	5,95	13,97	9,91	5,08	2,54	1,27
3600	6,00	13,97	10,16	5,08	2,54	1,27

Данные, представленные на рис. 6, 7 и в табл. 5, позволяют утверждать, что выполнив важную обобщенную работу, Дж. Э. Смит [11] приводит следующие основные выводы, которые необходимо использовать при проектировании и практическом применении гидравлического разрыва пласта.

- Эффективность переноса повышается с уменьшением размера частиц песка.
- Эффективность переноса снижается с увеличением концентрации песка в жидкостиносителе.
- Эффективность переноса песка повышается с увеличением сферичности зерен для крупных фракций (0,42–0,84 и 0,84–2,00 мм), однако остается почти неизменной для мелких фракций (0,177–0,42 мм).
- Схема перфорирования обсадной колонны не влияет на эффективность переноса расклинивающего материала.

- Минимальный диаметр перфорационного отверстия, при котором предотвращается эффект образования мостовой переемычки, изменяется в зависимости от концентрации расклинивающего материала в жидкости-носителе и размера частиц песка.
- Если входной диаметр перфорационного отверстия в 2–3 раза превышает диаметр частиц расклинивающего материала, то закупоривание этого отверстия происходит при концентрации расклинивающего материала в жидкости-носителе 60–120 кг/м³.
- Если входной диаметр перфорационного отверстия в 4–5 раз превышает диаметр частиц расклинивающего материала, то закупоривание этого отверстия происходит при концентрации расклинивающего материала приблизительно 240–420 кг/м³.
- Если отношение этих диаметров более 6, то закупоривание перфорационного отверстия не происходит даже при концентрации расклинивающего материала в жидкости-носителе 3 600 кг/м³ [11].

Дополнительно можно отметить, что диаметры перфорационных отверстий и особенно их форма зависят от концентрации расклинивающего материала в жидкости-носителе, количества песка, скорости прокачки технологической жидкости, формы и физико-механических свойств песка и материала обсадных (эксплуатационных) труб.

Именно форма и размеры перфорационных отверстий во многом определяют многие элементы гидродинамики потока технологических жидкостей при проведении гидравлического разрыва пласта.

Список литературы

1. Смит Дж. Э. Процессы гидравлического разрыва пласта с закачкой больших количеств песка. Часть 1 // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1990. – № 3. – С. 24-27.
2. Смит Дж. Э. Процессы гидравлического разрыва пласта с закачкой больших количеств песка. Часть 2 // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1990. – № 4. – С. 29-35.
3. Смит Дж. Э. Гидравлические разрывы пласта с закачкой больших количеств песка. Часть 3 // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1990. – № 5. – С. 11-16.
4. Смит Дж. Э. Процессы гидравлического разрыва пласта с закачкой больших количеств песка. Часть 4 // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. – 1990. – № 6. – С. 18-24.
5. Дияшев И. Р., Смаровозов А. А., Гиллард М. Р. Супер-ГРП на Яранерском месторождении // Нефтяное хозяйство. – 2001. – № 7. – С. 44-48.
6. Желтов Ю. П., Христианович С. А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта. – Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1955. – № 5. – С. 3-41.
7. Баренблатт Г. И. О некоторых задачах теории упругости, возникающих при исследовании механизма гидравлического разрыва нефтеносного пласта. // Прикладная математика и механика. – 1956. – Т. XX. – Вып. 4. – С. 475-486.
8. Баренблатт Г. И. Об образовании горизонтальных трещин при гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1956. – № 9. – С. 101-105.
9. Христианович С. А., Желтов Ю. П., Баренблатт Г. И. О механизме гидравлического разрыва пласта // Нефтяное хозяйство. – 1957. – № 1. – С. 44-53.
10. Желтов Ю. П. Об образовании вертикальных трещин в пласте при помощи фильтрующей жидкости. // Известия АН СССР. Отделение технических наук. – 1957. – № 8. – С. 56-62.
11. Смит Д. Э. Проектирование гидроразрыва пласта // Нефть, газ и нефтехимия. – 1991. – № 6. – С. 14-21.
12. Тимошенко С. П. Теория упругости. – М. – Л.: ОНТИ, 1934. – 451 с.
13. Ляв А. Математическая теория упругости. – М. – Л.: ОНТИ, 1935. – 676 с.

Сведения об авторе

Григулецкий Владимир Георгиевич, д. т. н., профессор, Российский государственный университет нефти и газа им. И. М. Губкина, Москва, тел. 8(495)9554507, e-mail: gvg-tnc@mail.ru

Information about the author

Gryguletski V. G., Doctor of Engineering, professor of Russia State University of Oil and Gas named after I. M. Gubkin, Moscow, phone: 8(495)9554507, e-mail: gvg-tnc@mail.ru