Способы перфорации скважин

Оборудование устья и забоев скважин

### § 3. Техника перфорации скважин

Существует четыре способа перфорации: пулевая, торпедная, кумулятивная, пескоструйная.

Первые три способа перфорации осуществляются на промыслах геофизическими партиями с помощью оборудования, имеющегося в их распоряжении. Поэтому детально техника и технология этих видов перфорации первыми тремя способами изучается в курсах промысловой геофизики. Пескоструйная перфорация осуществляется техническими средствами и службами нефтяных промыслов. При пулевой перфорации в скважину на электрическом кабеле спускается стреляющий пулевой аппарат, состоящий из нескольких (8 - 10) камор - стволов, заряженных пулями диаметром 12,5 мм. Каморы заряжаются взрывчатым веществом (ВВ) и детонаторами. При подаче электрического импульса происходит залп. Пули пробивают колонну, цемент и внедряются в породу. Существует два вида пулевых перфораторов:

перфораторы с горизонтальными стволами. В этом случае длина стволов мала и ограничена радиальными габаритами перфоратора;

перфораторы с вертикальными стволами с отклонителями пуль на концах для придания полету пули направления, близкого к перпендикулярному по отношению к оси скважины.

Пулевой перфоратор ПБ-2 собирается из нескольких секций. Вдоль секции просверлено два или четыре вертикальных канала, пересекающих каморы с ВВ, стволы которых заряжены пулями и закрыты герметизирующими прокладками. Верхняя секция - запальная имеет два запальных устройства. При подаче по кабелю тока срабатывает первое запальное устройство и детонация распространяется по вертикальному каналу во все каморы, пересекаемые этим каналом. В результате почти мгновенного сгорания ВВ давление газов в каморе достигает 2 тыс. МПа, под действием которых пуля выбрасывается.

Происходит почти одновременный выстрел из половины всех стволов. При необходимости удвоить число прострелов по второй жиле кабеля подается второй импульс и срабатывает вторая половина стволов от второго запального устройства. В этом перфораторе масса заряда ВВ одной каморы мала и составляет 4-5 г, поэтому пробивная способность его невелика. Длина образующихся перфорационных каналов составляет 65 - 145 мм (в зависимости от прочности породы и типа перфоратора). Диаметр канала 12 мм.

На рис. 4.6 показан пулевой перфоратор с вертикально-криволинейными стволами ПВН-90. При вертикальном расположении стволов объем камор и длина стволов больше.

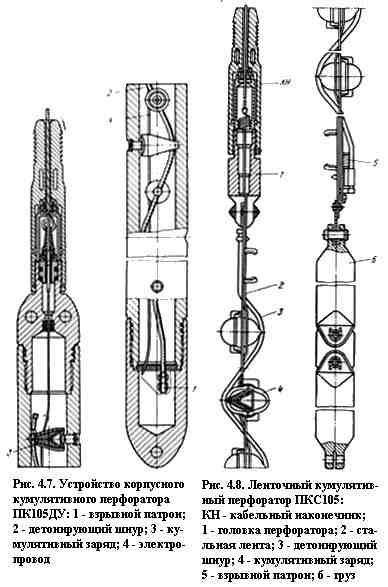
Одна камора отдает энергию взрыва сразу двум стволам. Масса ВВ в одной каморе достигает 90 г. Давление газов в каморах здесь ниже и составляет 0,6 - 0,8 тыс. МПа, но действие их более продолжительное. Это позволяет увеличить начальную скорость вылета пули и пробивную способность перфоратора. Длина перфорационных каналов в породе получается 145 - 350 мм при диаметре около 20 мм. В каждой секции перфоратора имеются четыре вертикальных ствола, на концах которых сделаны плавные желобки - отклонители. Пули, изготовленные из легированной стали, для уменьшения трения в отклонителях покрываются медью или свинцом. Выстрел из всех стволов происходит практически одновременный, так как все каморы с ВВ сообщаются огнепроводным каналом. В каждой секции два ствола направлены вверх и два вниз. Это позволяет компенсировать реактивные силы, действующие на перфоратор.

Торпедная перфорация осуществляется аппаратами, спускаемыми на кабеле и стреляющими разрывными снарядами диаметром 22 мм. Внутренний заряд ВВ одного снаряда равен 5 г. Аппарат состоит из секций, в каждой из которых имеется по два горизонтальных ствола. Снаряд снабжен детонатором накольного типа. При остановке снаряда происходит взрыв внутреннего заряда и растрескивание окружающей горной породы. Масса ВВ одной камеры - 27 г. Глубина каналов по результатам испытаний составляет 100 - 160 мм, диаметр канала - 22 мм. На 1 м длины фильтра обычно делается не более четырех отверстий, так как при торпедной перфорации часты случаи разрушения обсадных колонн.

Пулевая и торпедная перфорации применяются ограниченно, так как все больше вытесняются кумулятивной перфорацией.

Кумулятивная перфорация осуществляется стреляющими перфораторами, не имеющими пуль или снарядов. Прострел преграды достигается за счет сфокусированного взрыва. Такая фокусировка обусловлена коняческой формой поверхности заряда ВВ, облицованной тонким металлическим покрытием (листовая медь толщиной 0,6 мм). Энергия взрыва в виде тонкого пучка газов - продуктов облицовки пробивает канал. Кумулятивная струя приобретает скорость в головной части до 6 - 8 км/с и создает давление на преграду до 0,15 - 0,3 млн. МПа. При выстреле кумулятивным зарядом в преграде образуется узкий перфорационный канал глубиной до 350 мм и диаметром в средней части 8 - 14 мм. Размеры каналов зависят от прочности породы и типа перфоратора.

Все кумулятивные перфораторы имеют горизонтально расположенные заряды и разделяются на корпусные и бескорпусные. Корпусные перфораторы после их перезаряда используются многократно. Бескорпусные - одноразового действия. Однако разработаны и корпусные перфораторы одноразового действия, в которых легкий корпус из обычной стали используется только лишь для герметизации зарядов при погружении их в скважину.

 Перфораторы спускаются на кабеле (имеются малогабаритные перфораторы, опускаемые через НКТ), а также перфораторы, спускаемые на насосно-компрессорных трубах. В последнем случае инициирование взрыва производится не электрическим импульсом, а сбрасыванием в НКТ резинового шара, действующего как поршень на взрывное устройство. Масса ВВ одного кумулятивного заряда составляет (в зависимости от типа перфоратора) 25 - 50 г.

Максимальная толщина вскрываемого интервала кумулятнвным перфоратором достигает 30 м, торпедным - 1 м, пулевым - до 2,5 м. Это является одной из причин широкого распространения кумулятивных перфораторов.

Рассмотрим устройство корпусного кумулятивного перфоратора ПК-105ДУ (рис. 4.7), нашедшего широкое распространение. Электрический импульс подается на взрывной патрон 1, находящийся в нижней части перфоратора. При взрыве детонация передается вверх от одного заряда к другому по детонирующему шнуру 2, обвивающему последовательно все заряды.

Корпусные перфораторы позволяют простреливать интервал до 3,5 м за один спуск, корпусные одноразового действия - до 10 м и бескорпусные или так называемые ленточные - до 30 м.

Ленточные перфораторы (рис. 4.8) намного легче корпусных, однако их применение ограничено величинами давления и температуры на забое скважины, так как их взрывной патрон и детонирующий шнур находятся в непосредственном контакте со скважинной жидкостью. В ленточном перфораторе заряды смонтированы в стеклянных (или из другого материала'), герметичных чашках, которые размещены в отверстиях длинной стальной ленты с грузом на конце. Вся гирлянда спускается на кабеле. Обычно при залпе лента полностью не разрушается, но для повторного использования не применяется. Головка, груз, лента после отстрела извлекаются на поверхность вместе с кабелем. К недостаткам бескорпусных перфораторов надо отнести невозможность контролирования числа отказов, тогда как в корпусных перфораторах такой контроль легко осуществим при осмотре извлеченного из скважины корпуса.

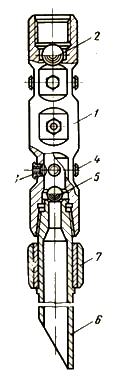
Кумулятивные перфораторы нашли самое широкое распространение. Подбирая необходимые ВВ, можно в широких диапазонах регулировать их термостойкость и чувствительность к давлению и этим самым расширить возможности перфорации в скважинах с аномально высокими температурами и давлениями. Однако получение достаточно чистых с точки доения фильтрации, и глубоких каналов в породе остается актуальной проблемой и до сих пор. В этом отношении определенным шагом вперед было осуществление пескоструйной перфорации, которая позволяет получить достаточно чистые и глубокие перфорационные каналы в пласте.

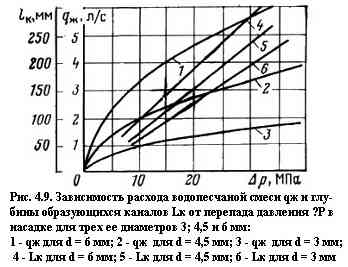
### § 4. Пескоструйная перфорация

При гидропескоструйной перфорации разрушение преграды происходит в результате использования абразивного и гидромониторного эффектов высокоскоростных песчано-жидкостных струй, вылетающих из насадок специального аппарата - пескоструйного перфоратора, прикрепленного к нижнему концу насосно-компрессорных труб. Песчано-жидкостная смесь закачивается в НКТ насосными агрегатами высокого давления, смонтированными на шасси тяжелых автомашин, поднимается из скважины на поверхность по кольцевому пространству. Это сравнительно новый метод вскрытия пласта. В настоящее время ежегодно обрабатываются около 1500 скважин этим методом. Область и масштабы применения гидропескоструйного метода обработки скважин постоянно расширяются, и кроме вскрытия пласта он нашел применение при капитальных ремонтах, вырезке колонн и в сочетании с другими методами воздействия.

При гидропескоструйной перфорации (ГПП) создание отверстий в колонне, цементном камне и канала в породе достигается приданием песчано-жидкостной струе очень большой скорости, достигающей нескольких сотен метров в секунду. Перепад давления при этом составляет 15 - 30 МПа. В породе вымывается каверна грушеобразной формы, обращенной узким конусом к перфорационному отверстию в колонне. Размеры каверны зависят от прочности горных пород, продолжительности воздействия и мощности песчано-жидкостной струи. При стендовых испытаниях были получены каналы до 0,5 м.

Размеры канала увеличиваются сначала быстро и затем стабилизируются в результате уменьшения скорости струи в канале и поглощения энергии встречным потоком жидкости, выходящей из канала через перфорационное отверстие.

Стендовые испытания ГПП, проведенные ВНИИ, позволили установить соотношения между параметрами процесса (рис. 4.9), необходимые для его проектирования. Результаты, приведенные на рис. 4.9, получены при разрушении цементных блоков, утопленной под уровень жидкости струей водопесчаной смеси. Время воздействия на преграду не должно превышать 15 - 20 мин, так как при более продолжительном воздействии каналы не увеличиваются.

Перфорация производится пескоструйным аппаратом, спускаемым на насосно-компрессорных трубах. Аппарат АП-6М конструкции ВНИИ (рис. 4.10) имеет шесть боковых отверстий,

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Рис. 4.10. Аппарат для пескоструйной перфорации АП-6М:

1 - корпус. 2 - шар опрессовочного клапана; 3 - узел насадки; 4 - заглушка;

5 - шар клапана; 6 - хвостовик; 7 - центратор

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

в которые ввинчиваются шесть насадок для одновременного создания шести перфорационных каналов. При малой подаче насосных агрегатов часть отверстий может быть заглушена пробками. Насадки в стальной оправе изготавливаются из твердых сплавов, устойчивых против износа водопесчаной смесью, трех стандартных диаметров 3; 4, 5 и 6 мм.

Насадки диаметром 3 мм применяются для вырезки прихваченных труб в обсаженной скважине, когда глубина резания должна быть минимальной. Насадки диаметром 4,5 мм используются для перфорации обсадных колонн, а также при других работах, когда возможный расход жидкости ограничен. Насадки диаметром 6 мм применяют для получения максимальной глубины каналов и при ограничении процесса по давлению.

Медленно вращая пескоструйный аппарат или вертикально его перемещая, можно получить горизонтальные или вертикальные надрезы и каналы. В этом случае сопротивление обратному потоку жидкости уменьшается и каналы получаются примерно в 2,5 раза глубже. В пескоструйном аппарате предусмотрены два шаровых клапана, сбрасываемых с поверхности. Диаметр нижнего клапана меньше, чем седло верхнего клапана, поэтому нижний шар свободно проходит через седло верхнего клапана.

После спуска аппарата, обвязки устья скважины и присоединения к нему насосных агрегатов система спрессовывается давлением, превышающим рабочее в 1,5 раза. Перед опрессовкой в НКТ сбрасывается шар диаметром 50 мм от верхнего клапана для герметизации системы. После опрессовки обратной промывкой, т. е. закачкой жидкости в кольцевое пространство, верхний шар выносится на поверхность и извлекается. Затем в НКТ сбрасывается малый - нижний шар, и при его посадке па седло нагнетаемая жидкость получает выход только через пасадки. После этого проводится перфорация закачкой в НКТ водопесчаной смеси. Концентрация песка в жидкости обычно составляет 80 - 100 кг/м3. При пескоструйной перфорации НКТ испытывают большие напряжения.

Усилия в муфтовом соединении НКТ в верхнем - наиболее опасном сечении от веса колонны НКТ и давления жидкости не должны превосходить усилия, страгивающего резьбовое соединение муфт, Рстр.

Общие гидравлические потери при гидропескоструйной перфорации складываются из следующих: P1 - потерь давления на трение в НКТ при движении песчано-жидкостной смеси от устья до пескоструйного аппарата; ΔP - потерь давления в насадках, определяемых по графикам или расчетным путем; P2 - потерь на трение восходящего потока жидкости в затрубном кольцевом пространстве; P3 - противодавления на устье скважины в затрубном пространстве при работе по замкнутой системе.

Так как гидростатические давления жидкости в НКТ и кольцевом пространстве уравновешены, то давление нагнетания на устье Pу будет равно сумме всех потерь:

. (4.26)

Величина P1 определяется по формулам трубной гидравлики

, (4.27)

где коэффициент трения λ определяется как обычно, через число Re, но увеличивается на 15 - 20% вследствие присутствия песка в жидкости; L - длина НКТ; dв - внутренний диаметр НКТ; vт - линейная скорость потока в НКТ, vт = 4Q/(πdв2); ρ - плотность песчано-жидкостной смеси.

Величина ΔP определяется по графикам (см. рис. 4.9). Величина Р2 также определяется по формуле трубной гидравлики для движения жидкости по кольцевому пространству

, (4.28)

где Dв - внутренний диаметр обсадной колонны, dн - наружный диаметр НКТ.

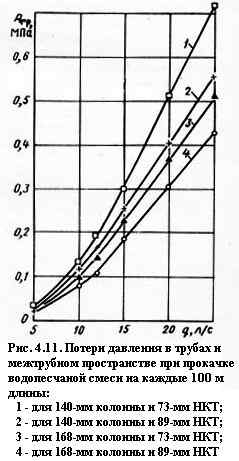
vк = 4Q/(π(Dв2 - dн2)) - линейная скорость восходящего потока жидкости в кольцевом пространстве, которая не должна быть меньше 0,5 м/с для полного выноса песка и предупреждения прихвата труб.

Во ВНИИ были определены суммарные потери на трение (Р1 + Р2) в реальных скважинах при прокачке водопесчаных смесей (рис. 4.11). Суммарный расход жидкости равен произведению числа действующих насадок n на расход жидкости через одну насадку qж:

. (4.29)

Например, при шести насадках и расходе через одну насадку 4 л/с общий расход составит 24 л/с, а потери на трение в скважине глубиной 1700 м при 168-мм колонне и 73-мм НКТ составит около 8,2 МПа (см. рис. 4.11). При расходе через 4,5-мм насадку, равном 4 л/с, перепад давления в насадках ΔP составит около 40,0 МПа (см. рис. 4.9

При выборе перепада давления в насадках следует иметь в виду, что нижний предел допустимых перепадов должен обеспечить эффективное разрушение колонны, цементного камня и породы, а поэтому не должен быть меньше 12,0 - 14,0 МПа для 6-мм насадок и 18,0 - 20,0 МПа для насадок 4,5 и 3 мм. При очень большой прочности горных пород (σсж> 20,0 - 30,0 МПа) нижние пределы, как показывает опыт, целесообразно увеличить до 18,0 - 20,0 МПа для 6-мм насадки и 25,0 - 30,0 МПа для 4,5-и 3-мм насадки.

Для точной установки перфоратора против нужного интервала применяют в колонне НКТ муфту-репер. Это короткий (0,5 - 0,7 м) патрубок с утолщенными стенками (15 - 20 мм), который устанавливают выше перфоратора на расстоянии одной или двух труб. После спуска колонны НКТ в нее опускают на кабеле малогабаритный геофизический индикатор, реагирующий на утолщение металла. Получая таким образом отметку муфты-репера, определяют положение перфоратора по отношению к разрезу продуктивного пласта. Однако при этом необходимо учитывать дополнительное удлинение НКТ при создании в них давления. Это удлинение, пропорциональное нагрузке, определяется формулой Гука

, (4.30)

где Ру - давление на устье скважины; F - площадь сечения НКТ; L - длина НКТ; Е - модуль Юнга, Па (обычно 20 •104 МПа); f - площадь сечения металла труб, м2; z - коэффициент, учитывающий трение труб о стенки обсадной колонны (принимают 1,5 - 2).

Эти дополнительные удлинения могут быть значительными и достигать 1 м.

При гидропескоструйной перфорации применяется то же оборудование, как и при гидроразрыве пласта. Устье скважины оборудуется стандартной арматурой типа 1АУ-700, рассчитанной на рабочее давление 70,0 МПа. Для прокачки песчано-жидкостной смеси используются насосные агрегаты, смонтированные на платформе тяжелых грузовых автомобилей 2АН-500 или 4АН-700, развивающие максимальные давления соответственно 50 и 70 МПа. При меньших давлениях используют цементировочные агрегаты, предназначенные для цементировочных работ при бурении. Число агрегатов n определяется как частное от деления общей необходимой гидравлической мощности на гидравлическую мощность одного агрегата, причем для запаса берется еще один насосный агрегат,

, (4.31)

где Q - расчетный суммарный расход жидкости; Pу - давление на устье скважины; qа - подача одного агрегата на расчетном режиме; Ра - давление, развиваемое агрегатом; η - коэффициент, учитывающий техническое состояние насосных агрегатов и их износ η = 0,75 - 1. Агрегат 4АН-700 снабжен дизелем мощностью 588 кВт при 2000 об/мин трехплунжерным насосом 4Р-700 с диаметрами плунжеров 100 или 120 мм. Ход плунжера 200 мм. Коробка передачи имеет четыре скорости. Характеристика агрегата приведена в табл. 4. 1. Песчано-жидкостная смесь готовится в пескосмесительном агрегате (2ПА; ЗПА и др.), который представляет собой бункер для песка емкостью 10 м3 с коническим дном. В нижней части

Таблица 4.1

Характеристика насосного агрегата 4АН-700

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Скорость | Частота вращения, 1/мин | Теоретическая подача, л/с, при втулках | | Давление, МПа | |
| 100 мм | 120 мм | 100 мм | 120 мм |
| 1 | 80 | 6,3 | 9 | 71,9 | 50,0 |
| 2 | 109 | 8,5 | 12,3 | 52,9 | 36,6 |
| 3 | 153 | 12,0 | 17,3 | 37,4 | 26,0 |
| 4 | 192 | 15,0 | 22,0 | 29,8 | 20,7 |

\* Примечание: к. п. д. агрегата - 0,83; коэффициент наполнения - 1; частота вращения

вала двигателя - 1800 1./мин.

бункера вдоль продольной оси установлен шнек. Скорость вращения шнека ступенчато изменяется от 13,5 до 267 об/мин. В соответствии с этим подача песка изменяется от 3,4 до 676 кг/мин. Кроме того, агрегат снабжен насосом 4НП (насос песковый) низкого давления для перекачки песчано-жидкостной смеси. Бункер со всем оборудованием смонтирован на шасси тяжелого автомобиля.

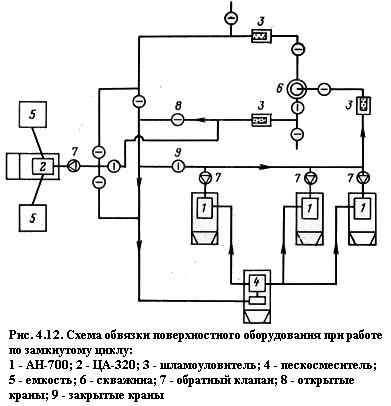
Специальные рабочие жидкости завозят на скважину автоцистернами или приготавливают в небольших (10 - 15 м3) емкостях, установленных на салазках. В обвязку поверхностного оборудования монтируют фильтры высокого давления - шламоуловители, предупреждающие закупорку насадок крупными частицами породы. Песчано-жидкостная смесь готовится тремя способами:

* с повторным использованием песка и жидкости (закольцованная схема);
* со сбросом отработанного песка с повторным использованием жидкости;
* со сбросом жидкости и песка.

Наиболее экономична закольцованная схема, так как при этом расходы жидкости и песка минимальные. Кроме того, при использовании специальных жидкостей (нефть, раствор кислоты, глинистый раствор и др.) не загрязняется территория. Для сравнения можно привести фактические данные, полученные на Узеньском месторождении. При работе по кольцевой схеме было израсходовано 20 м3 воды и 4,1 т песка, а при работе со сбросом воды и песка потребовалось 275 м3 воды и 14 т песка.

Схема (рис. 4.12) предусматривает также необходимые операции по промывке скважины как через колонну НКТ, так и через кольцевое пространство. Обязательным элементом схемы обвязки является установка обратных клапанов на выкидных линиях агрегатов и лубрикатора или байпаса для ввода шаров-клапанов пескоструйного аппарата.

В качестве рабочей используют различные жидкости, исходя из условия ее относительной дешевизны, предотвращения ухудшения коллекторских свойств пласта и открытого фонтанирования. Состав жидкости устанавливают в лабораториях. Для целей ГПП используют воду, 5 - 6%-ный раствор ингибированной соляной кислоты, дегазированную нефть, пластовую сточную или соленую воду с ПАВами, промывочный раствор. В случае если плотность рабочей жидкости не обеспечивает глушение скважины, добавляют утяжелители: мел, бентонит и др.

Объем рабочей жидкости принимается равным 1,3 - 1,5 объема скважины при работе по замкнутому циклу. При работе со сбросом объем жидкости определяют из простого соотношения

, (4.32)

где qн - -принятый расход жидкости через одну насадку; n - число одновременно действующих насадок; t - продолжительность перфорации одного интервала (15 - 20 мин); .N - число перфорационных интервалов.

Количество песка принимается из расчета 50 - 100 кг песка на 1 м3 жидкости.

Процесс ГПП связан с работой насосных агрегатов, развивающих высокие давления, и в некоторых случаях с применением горячих жидкостей. Поэтому проведение этих работ регламентируется особыми правилами по охране труда и пожарной безопасности, несоблюдение которых может привести к очень тяжелым последствиям. Перед началом работ обязательна опрессовка всех коммуникаций на давление, в 1,5 раза превышающее рабочее. ГПП осуществляют, начиная с нижних интервалов.

Пескоструйная перфорация в отличие от кумулятивной или пулевой перфорации позволяет получить каналы с чистой поверхностью и сохранить проницаемость на обнаженной поверхности пласта. Громоздкость операции, задалживание мощных технических средств и большого числа обслуживающего персонала определяют довольно высокую стоимость этого способа перфорации и сдерживают ее широкое применение по сравнению с кумулятивной перфорацией.