

Некоторые аспекты проблемы сертификации (аттестации) кумулятивных перфораторов

© А.В. Бабкин, Н.В. Герасимов, С.В. Ладов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены пять основных аспектов проблемы сертификации (аттестации) кумулятивных перфораторов, используемых при нефтегазовой добыче. К ним относятся: физический аспект (с точки зрения физики кумулятивного взрыва); методический аспект (методики сертификационно-аттестационных мероприятий: наиболее желательная, допустимая, недопустимая); экономический аспект (ориентироваться на экономию в большом масштабе, допуская возможный проигрыш в малом); технико-политический аспект (возможно, существуют факторы, в настоящий момент более важные, чем самые правильные физические соображения и самые совершенные методики); организационный аспект (рациональное разделение полномочий государственных ведомств). Наиболее важным и наукоемким является физический аспект, связанный с проектированием, устройством и действием кумулятивных зарядов перфораторов, которому уделено наибольшее внимание. Подробно проанализированы формирование, движение в свободном пространстве и действие по комбинированной преграде сталь — бетон — порода монолитных и порошковых кумулятивных струй из металлических и композитных материалов. Приведена сравнительная оценка пробивного действия кумулятивных зарядов перфораторов по различным методикам (отечественным и зарубежным). Выполнена оценка учета экономического, технико-политического и организационного факторов при разработке процедуры сертификации (аттестации) кумулятивных зарядов перфораторов. Даны рекомендации по проведению сертификационно-аттестационных испытаний кумулятивных зарядов перфораторов в РФ.

Ключевые слова: перфорация скважин, кумулятивный перфоратор, кумулятивный заряд, кумулятивная струя, комбинированная преграда, пробивное действие, методика испытаний, сертификация

Введение. В настоящее время во всем мире при добыче нефти и газа широко используются различные перфосистемы, главным образом пулевые и кумулятивные перфораторы. В процессе сооружения нефтяной скважины вскрытие продуктивного нефтегазового пласта в большинстве случаев проводят дважды: первый раз — при бурении скважины, второй раз — после крепления скважины цементированной обсадной колонной. Для множественной перфорации стенок обсадной колонны, цементного кольца и породы чаще всего используют кумулятивные перфораторы. Проектированию кумулятивных перфораторов, их устройству и действию посвящена обширная литература, например [1–4], в которой приведена, в том числе, широкая библиография по данному вопросу.

Главной составляющей кумулятивных перфораторов являются малогабаритные осесимметричные кумулятивные заряды (КЗ)

с металлической (чаще всего, медной) облицовкой кумулятивной выемки [5–9]. Такие КЗ в результате обжатия облицовки продуктами детонации взрыва заряда взрывчатого вещества формируют кумулятивные струи (КС), которые и реализуют пробитие комбинированной преграды сталь — бетон — порода (обеспечивают глубину пробития и диаметр образуемого отверстия). При этом функционирование КЗ происходит в условиях высоких давлений и температур, определяемых значительной глубиной нефтяных скважин, что накладывает определенные требования на их конструкцию и влияет на эффективность их действия.

Схема кумулятивной перфорации скважины представлена на рисунке. При перфорации скважины КС должна пробить сложную многослойную преграду, состоящую из слоя скважинной жидкости (толщиной 10...15 мм), стенки обсадной колонны (из стали толщиной 6...12 мм) и слоя цементного камня (20...50 мм), а затем углубиться в породу. Суммарная глубина проникания КС в такую сложную комбинированную преграду для разных кумулятивных перфораторов колеблется в пределах $L = 50...300$ мм. Для повышения продуктивности скважины необходимо стремиться к увеличению глубины и диаметра образующегося при перфорации канала. Для уменьшения гидравлического сопротивления канала предъявляются особые требования к чистоте канала, а также необходимо не допускать закупоривания его пестом. В связи с этим актуальны работы по получению КС с разрушающимися пестами путем использования облицовок, полученных прессованием порошков меди, вольфрама и др., либо иными способами [10–16].

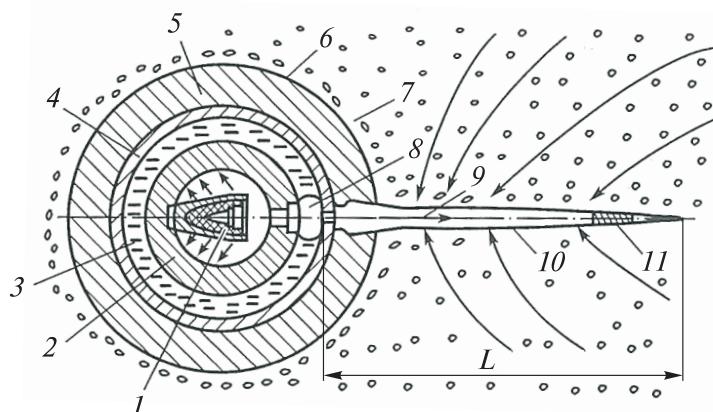


Схема кумулятивной перфорации скважины:

1 — кумулятивный заряд; 2 — корпус кумулятивного перфоратора; 3 — слой скважинной жидкости; 4 — стенка обсадной колонны; 5 — слой цементного камня; 6 — ствол скважины; 7 — нефтеносный слой породы; 8 — газовый пузырь; 9 — кумулятивная струя; 10 — перфорационный канал; 11 — пест

Для получения объективной информации о показателях действия соответствующих изделий (КЗ перфораторов) и выдачи на этой основе документа — сертификата требуется разработать процедуру их сертификации (аттестации) с учетом физических, методических, экономических, технико-политических и организационных аспектов обсуждаемой проблемы, что и является целью данной статьи. Рассмотрим поэтапно каждый из обозначенных аспектов и проанализируем их.

Физический аспект проблемы. Данный аспект связан со спецификой КС как физического объекта и с изменением ее проникающей способности по мере передвижения к преграде и проникания в саму преграду. Основные физические особенности формирования и движения КС из металлических материалов достаточно подробно изложены в работах [6, 17–19].

Приведем здесь минимально необходимый для раскрытия темы объем информации. Будем исходить из того, что КЗ перфораторов — короткофокусные.

При действии определенного КЗ по различным преградам (стальная, бетонная) одни и те же элементы КС (головные, срединные или хвостовые) до момента начала их проникания в ту или иную преграду могут проходить различные расстояния. Лишь головные элементы струи с этой точки зрения будут находиться примерно в одинаковых условиях. Для срединных же или хвостовых элементов совершаемые перемещения к моменту начала их проникания в бетонную преграду в несколько раз больше аналогичных перемещений, совершаемых при действии КЗ по стальной преграде. Осредненный количественный показатель этого увеличения — коэффициент соотношения пробития бетона и стали. Если КС по мере ее движения от места формирования в сторону преграды как-то изменяется и эти изменения затрагивают ее проникающую способность, то и в целом результат действия по преграде будет определяться развитием этих процессов. Поэтому поведение КС в свободном полете, а также предоставляемые для развития изменений в струе пространство и время являются важнейшими факторами, предопределяющими результат действия КЗ по преграде.

Кумулятивная струя, сформированная из обычной монолитной облицовки (например, медной), представляет собой высокоскоростной высокоградиентный стержень переменного сечения. Основное движение материала КС — осевое, осевая скорость уменьшается от головы к хвосту струи, при этом имеет место ненулевой градиент осевой скорости. Осевому движению сопутствует радиальное движение, направленное к оси симметрии. В норме оба эти движения согласованы. Градиентному удлинению струи обязательно сопутствует ее утонение — уменьшение радиальных размеров — при сохранении плотности примерно на уровне монолитного материала. Процесс

удлинения струи в течение определенного времени происходит равномерно с сохранением формы элементов, близкой к цилиндрической. Затем на струе развивается процесс шейкообразования, и в итоге струя пластически (через развитую шейку) разрывается на определенное количество отдельных безградиентных элементов, в дальнейшем движущихся друг за другом уже как абсолютно твердые тела вплоть до встречи с преградой. Разрыв высокоградиентной медной КЗ на отдельные элементы происходит на расстоянии нескольких калибров от основания КЗ (меньшее расстояние соответствует хвостовым элементам КС, большее — головным).

На этапе удлинения струи и до момента ее разрыва на отдельные элементы растут суммарная длина струи и ее проникающая способность [6]. Если произошел разрыв струи на отдельные безградиентные элементы, длина каждого из них после разрыва остается неизменной. Она характеризуется специальным количественным показателем — так называемым коэффициентом предельного удлинения. Неизменной остается и суммарная длина отдельных элементов. Для идеального заряда после разрыва струи пробивная способность достигает максимума, она будет оставаться таковой и неизменной даже с увеличением проходимых расстояний (например, в связи с уменьшением плотности пробиваемой преграды или же в связи с увеличением начального расстояния от КЗ до преграды). Для реального (технологически несовершенного) КЗ имеют место значительные отклонения от идеального случая. Образующиеся после разрыва отдельные безградиентные элементы представляют собой аэродинамически неустойчивые тела. Они легко теряют свою осевую ориентацию, вращаются относительно поперечной оси, кувыркаются. Их вклад в пробитие преграды может сильно уменьшаться. В дополнение к вращению отдельные элементы за счет асимметрии процесса схлопывания могут получать поперечные скорости. Это также негативный фактор — траектории элементов отклоняются от оси заряда, происходит намазывание элементов на стенки пробоины. Пробивная способность уменьшается, и это проявляется тем сильнее, чем больше расстояние полета до встречи с преградой и чем меньше радиус каверны в преграде. Радиус же каверны находится в обратной зависимости от прочности преграды: чем она больше, тем меньше радиус каверны. Таким образом, пробивная способность реального КЗ с обычной монолитной облицовкой изменяется сложным образом по мере увеличения по разным причинам размеров области движения КС. Сначала пробивная способность возрастает (работает эффект удлинения струи), а затем снижается (действие указанных выше негативных факторов). Экстремальным примером этого является следующий известный пример: если хороший (прецизионный) КЗ с монолитной медной облицовкой на оптимальном фокусном расстоянии в несколько калибров способен пробить стальную преграду

толщиной 8–10 калибров, то с расстояния в 1000 калибров тот же хороший КЗ не способен пробить и тонкого металлического листа.

Особый интерес представляет КС, формируемая зарядом с пористой порошковой (в частности, композитной) облицовкой, которая по своим свойствам и поведению значительно отличается от монолитной струи [12, 13, 15, 20–23].

В достаточно распространенном случае порошковая композитная КС представляет собой не сплошное, а объемно разрушенное тело — совокупность мелких частиц, каким-то образом взаимодействующих между собой по мере движения в пространстве. По отношению к такому объекту более точным было бы использовать термин «кумулятивный поток частиц», хотя более привычным термином является «кумулятивная струя».

В порошковой струе, как и в монолитной, сосуществуют осевое и радиальное движения. Эти два движения могут быть согласованными — осевому растяжению может сопутствовать радиальное схождение мелких частиц к оси симметрии при поддержании средней плотности струи на уровне исходной плотности композита (или при незначительном уменьшении). Такая струя очень хороша для пробития, особенно если исходная плотность композита достаточно велика (облицовки с вольфрамом или свинцом). В ней не действуют факторы, приводящие к ограничению длины, для нее теряет смысл понятие коэффициента предельного удлинения — по существу, это струя как бы с неограниченной способностью к удлинению. Осевое и радиальное движения в порошковой струе могут быть и рассогласованными — осевому удлинению может сопутствовать радиальное расхождение частиц. Такая струя по мере перемещения в пространстве «пухнет», ее средняя плотность уменьшается, а это приводит и к уменьшению проникающей способности.

Такое «благоприятное» (с точки зрения проникания в преграду) или «неблагоприятное» поведение движущейся порошковой струи зависит, в частности, от пористости облицовки и от ее состава. Чем больше пористость, тем больше проявляются свойства радиального расхождения материала струи и падения ее проникающей способности. Рассмотрим два крайних примера. В работе [19] в качестве материала облицовки выбран медно-вольфрамовый композит с пористостью менее 1 %. Результат — пробитие гомогенной стальной преграды до 10–12 калибров заряда. В работе [20] медная порошковая облицовка бралась при пористости 50...70 %. В этом случае пробитие стальной преграды не превышало 1 калибра. Состав композитной облицовки, в том числе и добавки графита, свинца, карбида вольфрама и др., также могут сильно влиять на конечный результат — пробивную способность порошковой струи. Причем влияние