

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].

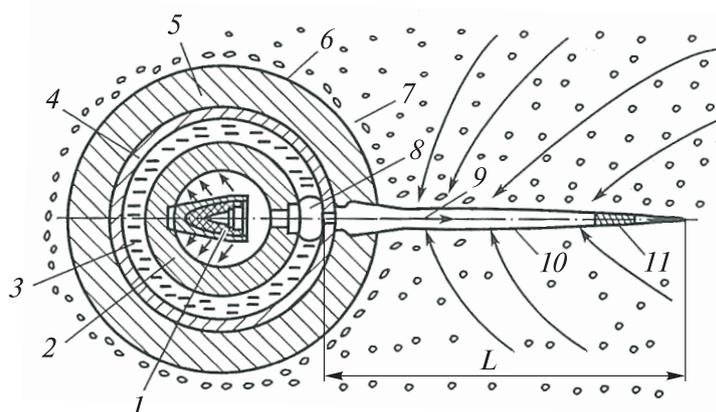


Схема кумулятивной перфорации скважины:

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

добавки способно сказываться как в «благоприятную», так и в «неблагоприятную» сторону в зависимости от ее вида и количественного содержания. При этом «благоприятное» поведение на начальном этапе жизни струи может смениться иным поведением на более поздних стадиях [19].

Вследствие наличия такого большого количества определяющих факторов и сложного характера зависимости от них проникающей способности порошковой струи практически невозможно заранее, для некоторого нового КЗ с порошковой облицовкой, достоверно предсказать поведение порошковой КС и пробивную способность КЗ. Это можно сделать только эмпирически — путем отстрелов КЗ по стальной преграде (как это делается в методике Ростехнадзора СС-05) или по бетонной преграде (как это делается в методиках американского института нефти API). Глубины пробития стальной преграды и бетонной преграды — это два дополняющих друг друга объективных показателя индивидуальных качеств КЗ с порошковой облицовкой. И уже чисто арифметическим следствием двух этих показателей является коэффициент соответствия пробитий по бетону и стали — также индивидуально присущий каждому КЗ. Физического смысла за ним не скрыто. Он может быть одинаковым как для очень хорошего заряда с большим пробитием одновременно и по бетону, и по стали, так и для очень плохого заряда с малым пробитием одновременно и по бетону, и по стали. Данный коэффициент не способен различать два этих совершенно противоположных случая. Он лишен реальной первичной информационной ценности, и поэтому его стоит использовать только в качестве информационного дополнения к действительно первичным показателям — показателям действия по бетонной и по стальной преграде.

Таким образом, с точки зрения физики кумулятивного взрыва взгляд на место, роль и значение коэффициента соответствия пробитий по бетону и стали следующий: реальное значение имеют лишь определяемые эмпирически показатели действия КЗ по бетонной и стальной преградам. Коэффициент соответствия пробитий по разным преградам, с одной стороны, индивидуален для каждого КЗ, с другой — вторичен. Он может быть определен лишь после экспериментального определения пробитий по бетону и стали. Всерьез рассчитывать на обоснованность действий в противоположном направлении (экспериментальное определение пробития стальной преграды, корректное определение коэффициента соответствия пробитий по бетону и стали, расчетное определение пробития бетонной преграды) нет никаких физических оснований. В связи с этим также не усматривается оснований для выделения более чем двух групп сравниваемых КЗ перфораторов — заряды глубокого проникновения (ГП) и заряды с большим отверстием (БО).

Методический аспект проблемы. Данный аспект связан с оценкой методик сертификационно-аттестационных мероприятий: наиболее желательная, допустимая, недопустимая.

Как следует из [23–26], сертификация и аттестация КЗ перфораторов или перфосистем в целом проводится для получения объективной информации о показателях действия изделий (их аттестации) и на этой основе для выдачи документа — сертификата (международного, внутригосударственного или отраслевого уровня), свидетельствующего о наличии у изделия определенных качеств, важных для потребителя данной продукции (их сертификация).

Совершенно очевидно, что аттестационные и тем более сертификационные испытания следует проводить в условиях, максимально приближенных к реальным условиям работы перфораторов, ведь для потребителя наиболее ценна именно информация о работе в реальных условиях, все же прочее второстепенно или малоинтересно. Поэтому с методической точки зрения из имеющихся методик аттестационно-сертификационных испытаний могут рассматриваться как наиболее желательные методики американского института нефти API — испытания собранного корпусного перфоратора при действии по бетонному блоку API RP-13B и испытания отдельных КЗ при действии также по бетонному блоку API RP-43. С беспристрастной и объективной позиции, отстраненной от каких-либо иных дополнительных соображений, стоило бы заимствовать имеющийся в данной области зарубежный опыт и повсеместно использовать эти методики, тем более что тогда выдается сертификат соответствия международного уровня. Испытания в условиях, максимально приближенных к реальным, позволят дать потребителю наиболее адекватную информацию о предлагаемых изделиях, их потребительских качествах. Однако можно предположить существование обстоятельств, препятствующих этому логически простому и методически наиболее правильному решению. Тогда становятся оправданными поиски альтернативных методик аттестационно-сертификационных испытаний. Видимо, такой методикой должна была бы стать методика Ростехнадзора СС-05.

С методической точки зрения подход, предлагаемый в методике СС-05, крайне несовершенен, если целью является все же определение интересующих потребителя характеристик действия КЗ по максимально приближенной к реальной бетонной преграде. Однако вместо бетонной берется стальная преграда, плотность которой примерно в 4 раза выше, к тому же она еще и прочнее (что способствует меньшему диаметру отверстия и усиливает проявление эффекта намазывания струи на стенки канала). Только за счет одной лишь плотности преграды глубина проникания должна снижаться в 2 раза [6], что влечет за собой соответствующее уменьшение размеров области пространства, в которой происходит движение КС, и исключает

из рассмотрения удаленную область возможного «неблагоприятного» поведения порошковой струи. Не будет способствовать приближению к реальным условиям и набор стальной преграды из относительно тонких, толщиной 10...25 мм, пластин. Практически трудно обеспечить прилегание пластин друг к другу без зазоров, а наличие макрозазоров, к тому же еще и множественных, может дополнительно уменьшать пробивное действие по стальной преграде.

Для испытуемого, ранее не исследованного (т. е. нового), заряда ни о каких иных характеристиках кумулятивного действия, кроме как о глубине и диаметре пробития стальной преграды (или алюминиевой преграды — для зарядов БО), испытания по методике СС-05 информации не дают. Для испытуемого нового заряда нельзя всерьез уповать на достоверное предсказание глубины пробития по бетону путем использования полученного ранее для каких-то других зарядов коэффициента соответствия пробитий по бетону и стали — это противоречит физике явления (см. пункт «Физический аспект проблемы»). При таком использовании в общем случае может быть получена всего лишь оценка первого приближения, а не интересующее потребителя достоверное знание характеристик действия КЗ перфоратора по бетонной преграде. Такие оценки первого приближения могут лишь вводить в заблуждение относительно истинных рабочих качеств новых изделий. В любом случае строить аттестационные или тем более сертификационные мероприятия новых зарядов лишь на испытаниях по стальной преграде по методике СС-05 с последующим пересчетом на пробитие бетона по коэффициенту соответствия представляется недопустимым. Это было бы большой ошибкой.

Однако ракурс восприятия испытаний по методике СС-05 можно несколько видоизменить. Ее можно рассматривать как часть более общей методики сертификации и аттестации КЗ перфораторов, лишенной указанных выше недостатков, а поэтому вполне приемлемой для использования.

Как указано в [26], в настоящее время разрабатывается отечественная версия методики испытаний действия КЗ перфораторов по бетонной преграде. Будем исходить из того, что такая методика создана и отличается от методики СС-05 главным образом типом используемой преграды. Эту предположительно существующую отечественную методику испытаний по бетонной преграде условно и для краткости будем называть СС-06.

Тогда можно построить вполне приемлемую систему аттестационно-сертификационных мероприятий на основе одновременного использования обеих методик. Применение более дорогой «бетонной» методики СС-06 должно быть минимально необходимо, а более дешевой «стальной» методики СС-05 — максимально возможно.

Основные черты этой системы можно представить примерно таким образом (статистические аспекты оставлены в стороне).

Появлению на отечественном рынке нового КЗ должна предшествовать процедура его сертификации и определения его потребительских свойств — пробивной способности по бетонной преграде (основная информация для потребителя) и по стальной преграде (дополнительная информация для последующей оптимизации (удешевления) аттестационных мероприятий). По-существу, два этих показателя определяют индивидуально присущий данному КЗ коэффициент соответствия пробитий по бетону и стали. В сертификате соответствия фиксируются, в частности, основной показатель — пробитие по бетонной преграде, дополнительный показатель — пробитие по стальной преграде, а также можно зафиксировать и арифметическое следствие двух этих показателей — коэффициент соответствия пробитий.

Последующие аттестационные мероприятия, периодически проводимые на предмет подтверждения того, что потребительские качества КЗ данного наименования продолжают соответствовать приведенным в сертификате показателям (технология не ухудшилась, хранение не привело к изменению характеристик, стабильность действия не упала и т. д.), вполне можно проводить по более дешевой «стальной» методике СС-05. При этом подтверждение соответствия показателя действия по стальной преграде его зафиксированному в сертификате значению вполне можно рассматривать как обоснование и проверку продолжающегося сохраняться соответствия и по основному показателю — пробитию по бетонной преграде.

Таким образом, между двух крайних вариантов проведения аттестационно-сертификационных мероприятий (наиболее желательные, но дорогие, методики проведения испытаний API RP-13B или API RP-43; относительно дешевая, но неприемлемая — «чистая» методика СС-05) просматривается компромиссный вариант, основанный на одновременном использовании методики СС-05 и аналогичной методики оценки действия КЗ по бетонной преграде.

Экономический аспект проблемы. Данный аспект должен ориентироваться на экономию в большом масштабе, допуская возможный проигрыш в малом.

Совершенно очевидно, что три охарактеризованных в предыдущем пункте возможных разновидности сертификационно-аттестационных испытаний КЗ перфораторов или перфосистем значительно отличаются друг от друга по стоимости и ресурсоемкости проводимых испытаний.

Самой затратной и ресурсоемкой является методика американского института нефти API RP-13B (для перфосистем) или API RP-43

(для КЗ перфораторов). Изготовление массивных и габаритных бетонных блоков с заданными характеристиками прочности, а также проведение самих испытаний и фиксация их результатов — трудоемки, дороги и требуют значительного времени. Однако при этом обеспечивается наибольшее приближение к реальным условиям работы перфораторов. Получаемая информация по эксплуатационным характеристикам изделий обладает высоким уровнем достоверности.

«Стальная» методика СС-05 — самая дешевая. Однако в ней присутствуют пересчетные экстраполяции на проникающее действие по бетонной преграде, в общем случае основанные на ранее полученных экспериментальных данных для совершенно других зарядов. Достоверность результатов для такого полуиспытания-полурасчета невелика, вследствие чего рынок может получать искаженные сигналы о потребительских качествах КЗ перфораторов.

При выборе между вариантами испытаний «точно и достоверно, но дорого» и «дешево, но недостоверно и оценочно» предпочтение, конечно, следует отдавать первому варианту. Как бы ни дороги были сертификационно-аттестационные испытания, их масштаб все же ограничен (десятки-сотни опытов). Он совершенно несоизмерим с масштабом массового использования кумулятивных перфораторов (~10 млн изделий в год по РФ). При таком сопоставлении масштабов относительная «разорительность» испытаний будет с лихвой компенсироваться повышенной эффективностью работы перфораторов, выбранных потребителем по итогам этих испытаний.

Вполне возможно, что третий из рассмотренных вариантов проведения сертификационно-аттестационных испытаний (сочетание «стальной» методики СС-05 и гипотетической «бетонной» методики СС-06) будет компромиссным не только по принципу реализации (см. пункт «Методический аспект проблемы»), но и по затратности при одновременном обеспечении достаточно высокого уровня достоверности результатов.

Технико-политический аспект проблемы. Данный аспект базируется на предположении, что, возможно, существуют факторы, в настоящее время более важные, чем самые правильные физические соображения и самые совершенные методики.

Интуитивно ощущается, что в решении о выборе сертификационно-аттестационных мероприятий в РФ существуют факторы, настолько мощные и важные, что на их фоне все самые правильные физические соображения и самые совершенные методики испытаний, приведенные выше, могут рассматриваться как временно второстепенные. Такими факторами, похоже, являются технико-политические факторы возрождения экономической независимости страны, создания благоприятных условий для отечественных фирм, пресечения

предпосылок для недобросовестной конкуренции со стороны западных фирм.

С этой точки зрения следование американским регламентам испытаний API RP-13B и API RP-43 может оказаться и не очень правильным. Это будет ставить наши фирмы (не имеющие в массовом порядке сертификаты API) во вторичное положение по отношению к фирмам западным (вся продукция которых полностью давно сертифицирована по API). С точки зрения разумного протекционизма грамотнее было бы организовать игру по российским правилам и ввести в действие российскую систему сертификационно-аттестационных мероприятий прострелочно-взрывной аппаратуры, обязательную для прохождения на всей территории РФ всеми участниками рынка, как отечественными, так и зарубежными. Такая отечественная система сертификационно-аттестационных испытаний КЗ перфораторов могла бы базироваться на одновременном использовании двух методик — существующей «стальной» методики СС-05 (без экстраполирующей пересчетной части) и ее разрабатываемого аналога с пробитием бетонной преграды (гипотетическая СС-06).

Можно предположить, что все нерациональности и несуразности в вопросе о сертификационно-аттестационных мероприятиях КЗ перфораторов и перфосистем, просматривающиеся у нас в стране в настоящее время, объясняются именно с позиций необходимости решения главной стратегической задачи — формирования рынка прострелочно-взрывных услуг в нефтегазодобывающей промышленности прежде всего в интересах нашей страны. С такой позиции терпимым покажется даже использование одной лишь «стальной» методики СС-05, как это и предложено делать в настоящее время [27]. Однако это может рассматриваться лишь как кратковременная мера, терпимая до разработки дополняющей отечественной «бетонной» методики. Нельзя затягивать с заменой методик испытаний, временно используемых по принципу наименьшего зла, на более совершенные методики, физически обоснованные, методически выверенные и в итоге приводящие к рыночному отбору наиболее эффективных изделий, ведь задача повышения эффективности нефте- и газодобычи для государства первостепенно значима и актуальна.

Организационный аспект проблемы. Данный аспект определяет рациональное распределение полномочий государственных ведомств.

По сравнению с ранее рассмотренными он носит частный характер, так что его вполне можно было бы оставить без внимания, но тем не менее здесь также хотелось бы большей рациональности в отношении разделения полномочий между двумя государственными ведомствами — Ростехрегулированием и Ростехнадзором.

Будем исходить из рассмотренной в пункте «Методический аспект проблемы» системы аттестационно-сертификационных мероприятий на основе одновременного использования «стальной» методики Ростехнадзора СС-05 (без экстраполирующей пересчетной части) и ее ныне находящегося в стадии разработки «бетонного» аналога (условно — методики СС-06).

Процедура сертификации КЗ перфораторов или перфосистем в целом проводится для получения объективной информации о показателях действия изделий и на этой основе для выдачи документа — сертификата (международного, внутригосударственного или отраслевого уровня), свидетельствующего о наличии у изделия определенных качеств, важных для потребителя данной продукции. При сертификации используются одновременно методики СС-05 (действие по стальной преграде) и СС-06 (действие по бетонной преграде). По-существу, речь идет об установлении соответствия изделий некоему стандарту качества. Очевидно, сертификацию должно организовывать и проводить государственное ведомство, на которое возложены соответствующие «стандартизирующие» функции, — Ростехрегулирование.

Последующие аттестационные испытания можно периодически проводить только по «стальной» методике СС-05 на предмет подтверждения того, что потребительские качества КЗ данного наименования продолжают соответствовать приведенным в сертификате показателям (технология не ухудшилась, хранение не привело к изменению характеристик, стабильность действия не упала и т. д.). Одновременно проверяется и соблюдение норм безопасности и порядка проведения взрывных испытаний для данного заряда. Таким образом, такие аттестационные испытания вполне может организовывать и проводить Ростехнадзор — ведомство-разработчик ныне действующей методики СС-05.

Заключение. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что привнесение элементов рационального и мотивированного устройства в общую систему сертификационно-аттестационных испытаний кумулятивных перфораторов в России позволит проводить периодическую сертификацию только по одной наиболее оптимальной по всем аспектам методике. Такой методикой может быть «стальная» методика СС-05 ведомственного разработчика — Ростехнадзора, по которой можно одновременно проверить соблюдение норм безопасности и порядок взрывных испытаний для конкретного КЗ перфоратора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вицени Е.М. *Кумулятивные перфораторы, применяемые в нефтяных и газовых скважинах*. Москва, Недра, 1971, 141 с.

- [2] Григорян Н.Г., ред. *Краткий справочник по прострелочно-взрывным работам*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва, Недра, 1990.
- [3] Ладов С.В., Кобылкин И.Ф. *Использование кумулятивных зарядов во взрывных технологиях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1995, 47 с.
- [4] Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. *Взрывные технологии*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 519 с.
- [5] Воротилин М.С., Дорофеев С.В., Князева Л.Н., Чуков А.Н. *Вопросы моделирования и конструирования кумулятивных зарядов*. Тула, ТулГУ, 1999, 166 с.
- [6] Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А. [и др.]. *Физика взрыва*. В 2 т. Т. 2. Орленко Л.П., ред. Изд. 3-е, испр. Москва, Физматлит, 2004, 656 с.
- [7] Минин И.В., Минин О.В. *Кумулятивные заряды*: монография. Новосибирск, СГГА, 2013, 200 с.
- [8] Бабурин М.А., Баскаков В.Д., Зарубина О.М. [и др.] Применение профилированных по толщине заготовок для управления толщиной стенки штампующих свинцом оболочковых деталей. *Технология металлов*, 2016, № 11, с. 7–8.
- [9] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Y.M., Ladov S.V. Compact element formation for modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth condition. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, no. 10, pp. 34–43.
- [10] Колмаков А.И., Ладов С.В., Силаева В.И. Влияние технологии изготовления, структуры и механических свойств облицовок на эффективность работы перфораторов. *Труды МВТУ. № 340 «Вопросы физики взрыва и удара»*. Москва, МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980, с. 27–35.
- [11] Дильдин Ю.М., Колмаков А.И., Ладов С.В., Орленко Л.П., Силаева В.И. Влияние ширины диффузионной зоны в многослойных облицовках профилированных зарядов на кумулятивный эффект. *Физика горения и взрыва*, 1980, т. 16, № 6, с. 65–69.
- [12] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Порошковые композиционные материалы для беспестовых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов. *Металловедение и термическая обработка металлов*, 1999, № 6, с. 27–29.
- [13] Быков Ю.А., Воркина Т.Е. Разработка материалов для беспестовых порошковых облицовок кумулятивных зарядов перфораторов. *Вестник МВТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1994, № 1, с. 25–31.
- [14] Аттетков А.В., Гнускин А.М., Пырьев В.А., Сагидуллин Г.Г. *Резка металлов взрывом*. Москва, СИП РИА, 2000, 260 с.
- [15] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Об одном возможном способе повышения пробития кумулятивного заряда. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2004, № 3 (40), с. 27–32.
- [16] Ладов С.В. История исследования взрывной кумуляции в МГТУ им. Н.Э. Баумана. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2018, вып. 6 (78). <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1776>
- [17] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Особенности инерционного растяжения кумулятивных струй в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2 (222), с. 3–9.
- [18] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Влияние сжимаемости и прочности материала кумулятивных струй на особенности их инерционного растяжения в свободном полете. *Прикладная механика и техническая физика*, 1997, т. 38, № 2 (222), с. 10–18.

- [19] Бабкин А.В., Ладов С.В., Маринин В.М., Федоров С.В. Закономерности растяжения и пластического разрушения металлических кумулятивных струй. *Прикладная механика и техническая физика*, 1999, т. 40, № 4 (236), с. 25–35.
- [20] Voumard C., Roduner H.P., Santschi W., Wister H. Performances and behavior of W–Cu pseudoalloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve. *Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics*. Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 1479–1487.
- [21] Тришин Ю.А., Кинеловский С.А. Влияние пористости на кумулятивное течение. *Физика горения и взрыва*, 2000, т. 36, № 2, с. 122–132.
- [22] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Некоторые особенности формирования кумулятивных струй из порошковых материалов. *Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук*, 2006, вып. 2 (47), с. 105–109.
- [23] Бабкин А.В., Ладов С.В., Федоров С.В. Особенности поведения в свободном полете кумулятивных струй из композитных порошковых облицовок. *Оборонная техника*, 2007, № 3–4, с. 38–53.
- [24] Сиволапов В. Каждый должен заниматься своим делом. *Экономика и ТЭК сегодня*, 2010, № 12, с. 38–40.
- [25] Шакиров Р.А. Сертификация или бизнес-проект? *Экономика и ТЭК сегодня*, 2010, № 12, с. 41–44.
- [26] Шакиров Р.А. Сертификация или бизнес-проект? *Каротажник: Научно-технический вестник*, 2010, вып. 1 (90), с. 136–154.
- [27] Гайворонский И.Н., Тебякин В.М. Доживем ли до цивилизованного рынка? *Каротажник: Научно-технический вестник*, 2010, вып. 1 (90), с. 155–168.

Статья поступила в редакцию 31.05. 2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бабкин А.В., Герасимов Н.В., Ладов С.В. Некоторые аспекты проблемы сертификации (аттестации) кумулятивных перфораторов. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-6-2083>

Бабкин Александр Викторович — д-р техн. наук, чл.-кор. РАЕН, профессор кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 250 научных работ в области физики взрыва и численного моделирования динамических процессов. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Герасимов Николай Викторович — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области физики. e-mail: gerasimovnv@bmstu.ru

Ладов Сергей Вячеславович — канд. техн. наук, чл.-кор. РАЕН, доцент кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 350 научных работ в области физики взрыва. e-mail: ladovsv@bmstu.ru

Some aspects of the shaped-charge perforator certification and qualification problem

© A.V. Babkin, N.V. Gerasimov, S.V. Ladov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The problem of certification of shaped-charge perforators appear to be very important in oil and gas production. The paper considers five aspects of the problem. First, it is a physical aspect, which means the problem is viewed from the point of view of the physics of a cumulative explosion; the second aspect is a methodological one, which implies the most desirable, permissible, unacceptable methods of certification and qualification; the next aspect is economic, it focuses on the economy on a large scale, allowing a possible loss in a small one. Perhaps, there are things that are currently more important than the most correct physical considerations and the most perfect methods, so technical and political aspects arise. The final aspect is an organizational one which implies a rational division of powers of government departments. The most important and science-intensive aspect is the physical one, as it is associated with the design, construction, and operation of shaped charges of perforators, and this is the main focus of the paper. The paper carefully analyzes the formation, movement in free space, and action on the combined obstacle: steel — concrete — rock of monolithic and powder cumulative jets from metal and composite materials. Moreover, the study comparatively assesses the penetrating action of shaped charges of perforators according to various methods, both domestic and foreign, and assesses economic, technical, political, and organizational factors in the development of the shaped charges certification procedure. Finally, the study gives recommendations for carrying out certification and qualification tests of shaped charges of perforators in Russia.

Keywords: well perforation, shaped-charge perforator, shaped charge, shaped-charge jet, combined barrier, penetrating action, test procedure, certification

REFERENCES

- [1] Vitseni E.M. *Kumulyativnye perforatory, primenyaemye v neftyanykh i gazovykh skvazhinakh* [Cumulative perforators used in oil and gas wells]. Moscow, Nedra Publ., 1971, 141 p.
- [2] Grigoryan N.G., ed. *Kratkiy spravochnik po prostrelochno-vzryvnym rabotam* [A quick reference book on perforating and blasting operations]. 3rd rev. ed. Moscow, Nedra Publ., 1990.
- [3] Ladov S.V., Kobylkin I.F. *Ispolzovanie kumulyativnykh zaryadov vo vzryvnykh tekhnologiyakh* [The use of shaped charges in explosive technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 1995, 47 p.
- [4] Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tekhnologii* [Explosive technologies.]. 2nd rev. ed. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 519 p.
- [5] Vorotilin M.S., Dorofeev S.V., Knyazeva L.N., Chukov A.N. *Voprosy modelirovaniya i konstruirovaniya kumulyativnykh zaryadov* [Problems of modeling and design of shaped charges]. Tula, Tula State University Publ., 1999, 166 p.
- [6] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., et al. *Fizika vzryva* [Physics of explosion]. In 2 vols., vol. 2. Orlenko L.P., ed. 3rd rev. ed. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 656 p.

- [7] Minin I.V., Minin O.V. *Kumulyativnye zaryady: monografiya* [Shaped charges: monograph]. Novosibirsk, SSUGT Publ., 2013, 200 p.
- [8] Baburin M.A., Baskakov V.D., Zarubina O.M., et al. *Tekhnologiya metallov — Russian metallurgy (Metally)*, 2016, no. 11, pp. 7–8.
- [9] Selivanov V.V., Fedorov S.V., Nikolskaya Y.M., Ladov S.V. Compact element formation for modeling of the high-velocity impacts of particles onto spacecraft materials and construction elements in earth condition. *Acta Astronautica*, 2017, vol. 135, no. 10, pp. 34–43.
- [10] Kolmakov A.I., Ladov S.V., Silaeva V.I. *Trudy MVTU. Voprosy fiziki vzryva I udara (Proceedings of BMHTS. Problems of physics of explosion and impact)*, no. 340. Moscow, BMHTS Publ., 1980, pp. 27–35.
- [11] Dildin Yu.M., Kolmakov A.I., Ladov S.V., Orlenko L.P., Silaeva V.I. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1980, vol. 16, no. 6, pp. 65–69.
- [12] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov — Metal Science and Heat Treatment*, 1999, no. 6, pp. 27–29.
- [13] Bykov Yu.A., Vorkina T.E. *Vestnik MVTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Vestnik MVTU im. N.E. Bauman. Ser. Mechanical Engineering*, 1994, no. 1, pp. 25–31.
- [14] Attetkov A.V., Gnuskin A.M., Pyrev V.A., Sagidullin G.G. *Rezka metallov vzryva* [Explosion metal cutting]. Moscow, SIP RIA Publ., 2000, 260 p.
- [15] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2004, no. 3 (40), pp. 27–32.
- [16] Ladov S.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2018, iss. 6 (78).
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2018-6-1776>
- [17] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika I tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2 (222), pp. 3–9.
- [18] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika I tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1997, vol. 38, no. 2 (222), pp. 10–18.
- [19] Babkin A.V., Ladov S.V., Marinin V.M., Fedorov S.V. *Prikladnaya mekhanika I tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 1999, vol. 40, no. 4 (236), pp. 25–35.
- [20] Voumard C., Roduner H.P., Santschi W., Wister H. Performances and behavior of W–Cu pseudoalloy shaped charges with a simple model for calculating the stand-off curve. *Proc. 19th Int. Symp. on Ballistics*. Interlaken, Switzerland, 2001, pp. 1479–1487.
- [21] Trishin Yu.A., Kinelovskiy S.A. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 2, pp. 122–132.
- [22] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Bulletin of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences)*, 2006, no. 2 (47), pp. 105–109.
- [23] Babkin A.V., Ladov S.V., Fedorov S.V. *Oboronnaya tekhnika (Defense technology)*, 2007, no. 3–4, pp. 38–53.
- [24] Sivolapov V. *Ekonomika i TEK segodnya (Economics and Fuel and Economic Complex Today)*, 2010, no. 12, pp. 38–40.
- [25] Shakirov R.A. *Ekonomika i TEK segodnya (Economics and Fuel and Economic Complex Today)*, 2010, no. 12, pp. 41–44.

- [26] Shakirov R.A. *Karotazhnik: Nauchno-tekhnicheskiy vestnik — Well Logger*, 2010, no. 1 (90), pp. 136–154.
- [27] Gayvoronskiy I.N., Tebyakin V.M. *Karotazhnik: Nauchno-tekhnicheskiy vestnik — Well Logger*, 2010, no. 1 (90), pp. 155–168.

Babkin A.V. (b. 1954) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1978, Dr. Sc. (Eng.), Corresponding Member, RANS, Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow Technical University; author of over 250 research papers in the field of physics of explosion and numerical simulation of dynamic processes. e-mail: pc-os@bmstu.ru

Gerasimov N.V. (b. 1959) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1982, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of Physics, Bauman Moscow Technical University; author of over 100 research papers in the field of physics. e-mail: gerasimovnv@bmstu.ru

Ladov S.V. (b. 1949), graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1972, Cand. Sc. (Eng.), Corresponding Member, RANS, Assoc. Professor, Department of High-Precision Airborne Devices, Bauman Moscow Technical University; author of over 350 research papers in the field of physics of explosion. e-mail: ladovsv@bmstu.ru