

ДЕТОНАЦИЯ ВЗРЫВНОГО ПРОППАНТА —  
ГЕКСОГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ВОДОНАСЫЩЕННОГО  
ПЕСКА

А. А. Сулимов<sup>1</sup>, Б. С. Ермолаев<sup>1</sup>, С. Б. Турунтаев<sup>2</sup>,  
А. А. Борисов<sup>1</sup>, М. К. Сукоян<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИХФ РАН

г. Москва, Россия

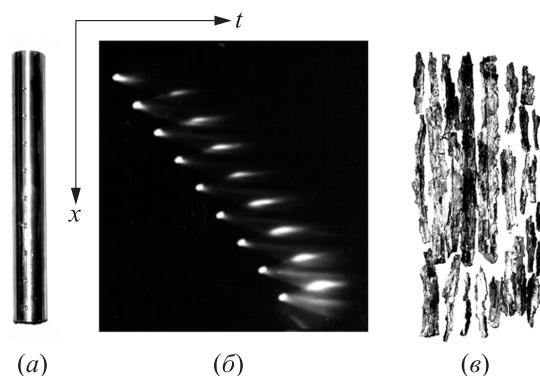
<sup>2</sup>ИДГ РАН

г. Москва, Россия

Использование взрывчатых материалов в технологии нефтедобычи, в частности при гидроразрыве нефтеносного пласта, является одним из современных применений результатов, полученных в области физики взрыва. Одной из задач, связанных с гидроразрывом, является оценка параметров образующихся трещин. Термин «взрывной проппант» (*от англ. explosive containing proppant*) появился после публикации патента [1], где предлагалось вместе с проппантом (песком или керамикой), который используется для того, чтобы предотвратить закрытие трещины после снятия нагрузки, ввести в зону гидроразрыва взрывчатый материал. При детонации взрывчатки создается акустический сигнал, который улавливается дистанционными сейсмодатчиками и после обработки используется для получения информации о размерах гидроразрыва и его ориентации.

Фактически взрывной проппант представляет собой водонасыщенную смесь взрывчатого материала и песка. Он должен устойчиво детонировать в узких трещинах с раскрытием менее 10 мм. Взрывчатый материал в составе проппанта должен обладать высокой детонационной способностью, высокой энергетикой, термостойкостью, приемлемой стоимостью, безопасностью транспортировки и обращения в присутствии воды. По мнению авторов, перечисленным требованиям вполне удовлетворяет гексоген.

Детонационные свойства тройных смесей, аналогичных взрывному проппанту, ранее не исследовались. Цель настоящего исследования состоит в определении критических условий и параметров детонации трехкомпонентной взрывчатой смеси гексоген/вода/песок, предлагаемой для использования в качестве взрывного проппанта. Авторы выбрали стандартный полидисперсный гексоген (средний размер частиц 60 мкм); песок с размером частиц 0,63–1 мм моделировал расклинивающий проппант марки 16/30. Исследовались смеси, в которых отношение гексогена и песка варьировалось в широком пределе. Вода вводилась в количестве, обеспечивающем полное заполнение



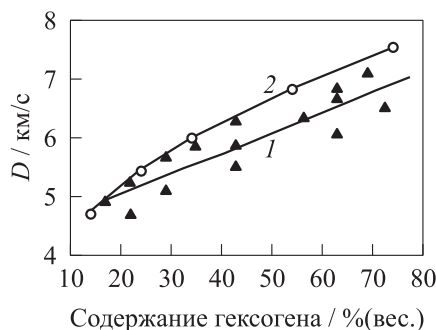
**Рис. 1** Фотография оболочки перед опытом (а); щелевая фоторегистрация (б); фрагменты разрушенной оболочки после опыта (в). Скорость детонации 5350 м/с

поровых промежутков между частицами дисперсной фазы; ее типичное значение равнялось 14 %(вес.). Исследуемый образец помещался в канал оболочки из дуралюмина, материала, близкого по динамическим свойствам к известняку, одной из основных пород нефтеносных пластов. Канал оболочки имел цилиндрическую форму или форму плоской щели. Дополнительные серии опытов были проведены с гексогеном, рассеянным с помощью сит на узкие фракции, с мелким песком, а также при начальной температуре, повышенной до 90 °С. Экспериментальные данные по детонации исследуемых тройных смесей сопоставлены с термодинамическими расчетами.

Расчеты параметров детонации взрывного пропранта проводились с помощью программы DNITREM [2] с использованием уравнения состояния ВКWS. Принималось, что песок является инертной добавкой, которая находится в механическом равновесии с продуктами детонации смеси гексоген + вода, и имеет температуру, отличную от температуры продуктов детонации.

В первой серии опытов применялись цилиндрические оболочки внутренним диаметром 10 мм, внешним диаметром 35 мм и длиной 200 мм. По длине оболочки сверлили отверстия диаметром 1,5 мм с шагом 20 мм. Для усиления свечения при детонации в отверстия вводили небольшое количество порошкообразного тэна. Заряд инициировали стандартным капсулем-детонатором ЭД-8. Скорость детонации измеряли с помощью скоростного ждущего фоторегистра ЖФР-3. Пример регистрации для состава гексоген/вода/песок 29/18/53 дан на рис. 1.

Результаты измерения скорости детонации в зависимости от содержания полидисперсного гексогена в смеси даны на рис. 2. В диапазоне от 74 до 22 %(вес.) гексогена скорость детонации снижается от 6,7 до 5,0 км/с. При



**Рис. 2** Зависимость скорости детонации смесей гексоген/вода/песок от содержания гексогена: 1 — эксперимент в цилиндрической оболочке с каналом диаметром 10 мм; 2 — термодинамический расчет

содержании гексогена ниже 17%(вес.) детонация в данном диаметре (10 мм) затухает. Корреляционная зависимость скорости детонации от содержания гексогена  $X$  (в весовых процентах) может быть представлена следующей формулой:

$$D = 4,33 + 0,035X \text{ [км/с]}.$$

Здесь же для сравнения приведены расчетные данные. Они находятся в хорошем согласии с экспериментом, хотя немного превышают измеренные значения. Согласуется также и вид зависимости скорости детонации от содержания гексогена.

В другой серии опытов было рассмотрено влияние размера частиц песка и гексогена (с этой целью из полидисперсного гексогена выделялись более узкие фракции размером менее 0,2 и 0,4–0,7 мм). Мелкая фракция песка имела частицы размером 0,25–0,4 мм. Укрупнение частиц гексогена привело к заметному снижению скорости детонации и увеличению критического диаметра детонации. Содержание гексогена, при котором детонация затухала в заряде диаметром 10 мм, увеличилось с 17 до 43 %(вес.). Мелкая фракция гексогена в сочетании с песком основной фракции (0,63–1 мм) не обнаружила заметных отличий от основной серии опытов.

Для определения критического размера детонации использовались оболочки с цилиндрическим и щелевым каналами ступенчатой формы. Определяющий размер (диаметр канала или раскрытие щели) оставался постоянным на длине 40–60 мм, а затем уменьшался на 1 или 2 мм и т. д. Максимальный размер на входе в канал оболочки равнялся 10, 7 или 5 мм. Ширина щелевого канала равнялась 20 мм. Оболочки со щелевым каналом изготавливали в виде двух разъемных пластин толщиной 10 мм, скрепляемых болтами. Важный результат этих исследований состоит в том, что, несмотря на уменьшение раскрытия, детонация проходит на всю длину канала, сохраняя постоянную скорость, величина которой лишь немного ниже измеренной для данного состава в цилиндрическом канале диаметром 10 мм. Достигнув участка, где раскрытие оказывается меньше критического, детонация резко обрывается. Такое поведение детонации исследуемых смесей напоминает детонацию жидких гомогенных ВВ, в случае которых, как известно, скорость детонации практически не зависит от диаметра заряда вплоть до критического диаметра [3].

Критические условия срыва детонации в плоских ( $h_{cr}$ ) и цилиндрических ( $d_{cr}$ ) каналах для оболочек из дуралюмина

Состав смеси гексоген/вода/песок, %(вес.)	Критическое раскрытие плоской щели, мм	Критический диаметр детонации, мм
17/13/70	—	$\geq 10$
22/13/66	4–5	$\sim 10$
29/13/58	3–4	3–5
35/13/52	2–3	—
43/14/43	2–3	2–4
63/16/21	$< 1$	$< 2$

Данные по критическим условиям срыва детонации в щелевых каналах приведены в таблице. На смеси с 63%(вес.) гексогена детонация прошла с постоянной скоростью 6,5 км/с на всю длину оболочки; последняя секция оболочки имела раскрытие 1 мм (минимальная величина раскрытия в данной серии опытов). Можно заключить, что для этого состава критический размер щелевого заряда меньше 1 мм. В этой же таблице приведены данные, полученные аналогичным образом на сужающихся каналах цилиндрической формы. Видно, что с увеличением содержания гексогена критические размеры снижаются и при содержании выше 30%(вес.) детонация устойчиво распространяется в узких трещинах с раскрытием 1–3 мм.

Поскольку температура нефтеносных слоев, где предполагается использовать взрывной пропант, обычно выше нормальной температуры, была проведена серия опытов при температуре 90 °С. В опытах использовались оболочки с сужающимися щелевыми каналами. Результаты измерений скорости детонации, в пределах разброса, оказались почти такими же, как в опытах при нормальной температуре, однако критическое раскрытие канала снизилось почти в 3 раза. Граница для смесей, которые способны детонировать при раскрытии 10 мм, снизилась с 17 до 13%(вес.) гексогена. Отметим, что для жидких ВВ также наблюдается существенное снижение критического диаметра детонации с увеличением начальной температуры [4].

Итак, проведенные исследования показали, что гексоген может быть использован в качестве взрывчатой добавки к расклинивающему наполнителю, который закачивается в создаваемые трещины нефтеносных пластов. Опыты проводились в дюралюминиевых оболочках с цилиндрическими и плоскими каналами постоянного и уменьшающегося по длине сечения. Изучена зависимость скорости детонации от содержания гексогена в смеси в диапазоне 14–74%(вес.), размера частиц гексогена и песка и начальной температуры. Критический размер заряда, способного детонировать, снижается при увеличении содержания гексогена в смеси, составляя всего несколько миллиметров при содержании гексогена от 30% и выше. Поли-

дисперсный гексоген обеспечивает высокую детонационную способность смесей; узкие фракции гексогена, в особенности крупный гексоген с частицами размером 0,4–0,7 мм, заметно повышает критический диаметр детонации. Повышение начальной температуры от 20 до 90 °С в 3 раза снижает критический диаметр детонации. Детонация исследуемых смесей в сужающемся канале протекает с постоянной скоростью, которая мало отличается от скорости детонации, измеренной в цилиндрическом канале. Достигнув участка, где раскрытие канала оказывается меньше критического, детонация резко обрывается. Такое поведение детонации исследуемых смесей напоминает детонацию жидких гомогенных ВВ.

Термодинамические расчеты детонации взрывного пропанта показали хорошее согласие с экспериментом по скорости детонации и ее зависимости от содержания гексогена. Это дает основание заключить, что гексоген в смеси с водонаполненным песком детонирует в пределах узкой зоны реакции без существенных потерь тепла конвекцией на нагрев инертной добавки. Далее, благодаря согласию расчетных и измеренных скоростей детонации, можно с высокой степенью доверия относиться к другим расчетным характеристикам детонации, например к давлению детонации и теплоте взрыва. Достаточно высокие расчетные давления детонации исследованных смесей, лежащие в диапазоне от 7,4 до 21,5 ГПа при содержании гексогена 14–74%(вес.), можно рассматривать как благоприятный фактор, способствующий трещинообразованию и интенсивному дроблению породы, окружающей трещину гидроразрыва.

Авторы выражают благодарность Московскому научно-исследовательскому центру Шломберже за постановку проблемы, финансовую поддержку исследований и обсуждение результатов.

## Литература

1. Willberg, D., J. Desroches, K. Babour, *et al.* 2006. Mapping fracture dimensions. Patent US7134492.
2. Имховик Н. А., Соловьев В. С. Расчет равновесных термодинамических параметров и состава продуктов детонации конденсированных ВВ // Вестник МГТУ, Сер. Машиностроение, 1993. № 2. С. 53.
3. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. — М.: Мир, 1973. 352 с.
4. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х. Влияние начальной температуры на величину критического диаметра нитроглицерина и тротила // ЖФХ, 2960. Т. 34. С. 603.