

**ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ
И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ**

УДК 532.5

**ДЕТОНАЦИЯ ВЗРЫВНОГО ПРОППАНТА – ГЕКСОГЕНСОДЕРЖАЩЕГО
ВОДОНАСЫЩЕННОГО ПЕСКА**© 2014 г. А. А. Сулимов^{1*}, Б. С. Ермолаев¹, С. Б. Турунтаев², А. А. Борисов¹, М. К. Сукоян¹¹Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва²Институт динамики геосфер Российской академии наук, Москва

*E-mail: aasul@center.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 17.04.2013

Проведены экспериментальные исследования и термодинамические расчеты детонации взрывного проппанта – гексогенсодержащего водонасыщенного песка. Исследуемый материал представляет интерес для использования в качестве взрывчатой добавки к расклинивающему наполнителю, который закачивается в трещины гидравлического разрыва нефтеносных пластов. Опыты проводились в дюралюминиевых оболочках с цилиндрическим и плоским каналами. Изучена зависимость скорости детонации от содержания гексогена в смеси в диапазоне от 14 до 74 вес. %, размеров частиц гексогена, песка и начальной температуры. Критический диаметр заряда, способного детонировать, снижается при увеличении содержания гексогена в смеси, составляя всего несколько миллиметров при содержании гексогена от 30 вес. % и выше. Полидисперсный гексоген обеспечивает высокую детонационную способность смесей; фракции частиц гексогена в узком диапазоне размеров, в особенности крупный гексоген с частицами размером 0.4–0.7 мм, заметно повышают критический диаметр детонации. При повышении начальной температуры смеси от +20°C до +90°C критическая толщина детонации снижается в несколько раз. Детонация исследуемых смесей в сужающемся плоском 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. Термодинамические расчеты детонации взрывного проппанта проведены с использованием уравнения состояния ВКWS в предположении, что песок является инертной добавкой, которая находится в механическом равновесии с продуктами детонации смеси гексоген + вода. Получено удовлетворительное согласие с экспериментом по скорости детонации и ее зависимости от содержания гексогена. Это позволяет заключить, что гексоген в смеси с водонаполненным песком детонирует в пределах узкой зоны реакции, без существенных потерь тепла на нагрев инертной добавки путем конвекции.

Ключевые слова: детонация, водонасыщенный песок, гексоген, взрывной проппант.

DOI: 10.7868/S0207401X14050136

ВВЕДЕНИЕ

В статье рассматривается одно из возможных направлений использования взрывчатых материалов в технологии нефтедобычи, в частности при гидроразрыве нефтеносного пласта. Гидроразрыв пласта представляет собой технологический процесс увеличения проницаемости призабойной зоны скважины путем образования в пласте новых трещин или углубления и расширения уже имеющих естественных трещин. С этой целью в призабойную зону пласта под давлением закачивают специальную жидкость (в основном это вода с некоторыми добавками, повышающими вязкость), которая разрывает пласт, после чего образующиеся трещины заполняют наполнителем – проппантом, препятствующим закрытию трещин после снятия давления закачиваемой жидкости. В качестве проппанта обычно используют инертный гранулированный материал, состоящий из частиц песка или керамики.

Одной из задач, связанных с гидроразрывом, является оценка параметров образующихся трещин. Решение, предлагаемое в патентах [1, 2], основано на том, чтобы вместе с проппантом ввести в зону гидроразрыва взрывчатый материал, при детонации которого создается акустический сигнал. Сигнал улавливается дистанционными сейсмодатчиками и после обработки используется для получения информации о размерах гидроразрыва и его ориентации. Вместе с тем, если взрывчатый материал обладает достаточной энергией, то он может быть использован также для создания дополнительных трещин в результате дробления породы в области, примыкающей к трещине гидроразрыва.

Водонасыщенная смесь взрывчатого материала и песка получила название “взрывной проппант” (от английского термина “explosive proppant”). Взрывной проппант должен устойчиво детонировать в узких трещинах с раскрытием менее

10 мм. Взрывчатый материал, входящий в состав смеси, должен обладать высокой детонационной способностью, высокой энергетикой, термостойкостью, приемлемой стоимостью и безопасностью транспортировки и обращения при наличии воды. Детонационные свойства тройных смесей, аналогичных взрывному пропанту, ранее не исследовались. Известно, что скорость детонации двойных смесей ВВ с инертной дисперсной добавкой существенно снижается при увеличении содержания и уменьшении размера частиц последней [3]. Критический диаметр детонации для жидких ВВ типа нитрометана с добавками дисперсных инертных частиц также снижается при уменьшении размера частиц добавки [4]. При наполнении водой промышленных ВВ обычно возрастают как скорость детонации, так и критический диаметр. Так, например, критический диаметр детонации для водонаполненных зерногранулитов превышает 50 мм [5].

Цель настоящего исследования состоит в определении критических условий и параметров детонации трехкомпонентной взрывчатой смеси гексоген/вода/песок, предлагаемой для использования в качестве взрывного пропантанта. В качестве взрывчатого материала был выбран стандартный полидисперсный гексоген; песок с размером частиц 0.63–1.0 мм моделировал расклинивающий пропант марки 16/30. В опытах исследовались смеси, в которых содержание гексогена и песка варьировалось в широких пределах. Вода вводилась в количестве, обеспечивающем заполнение поровых промежутков между частицами дисперсной фазы; для смесей разного состава содержание воды составило от 12 до 18 вес. %. Исследуемый образец помещался в канал толстостенной оболочки из дюралюминия, — материала, близкого по динамическим свойствам к известняку — наиболее распространенной породе нефтеносных пластов. Канал оболочки имел цилиндрическую форму или форму плоской шели. Дополнительные серии опытов были проведены с гексогеном, рассеянным с помощью сит на узкие фракции и содержащим мелкий песок, а также при начальной температуре, повышенной до 90°C. Экспериментальные данные по детонации исследуемых тройных смесей сопоставлены с термодинамическими расчетами.

1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ПАРАМЕТРОВ ДЕТОНАЦИИ ВОДОНАПОЛНЕННЫХ СМЕСЕЙ ГЕКСОГЕНА С ПЕСКОМ

Расчеты проводились с помощью программы DNITREM [6] с уравнением состояния продуктов детонации BKWS. Использовались следующие предположения.

1. Продукты детонации содержат продукты химического превращения смеси ВВ и воды и инертную добавку (песок).

2. Продукты химического превращения находятся в полном термодинамическом равновесии.

3. Песок рассматривается как инертная сжимаемая добавка, которая находится в механическом равновесии с продуктами детонации (т.е. их давление и массовая скорость одинаковы), но не участвует в химических взаимодействиях и имеет температуру, отличную от температуры продуктов детонации. Термодинамические свойства песка определяются ударной адиабатой, в качестве которой использована ударная адиабата кварца с начальной плотностью 2.65 г/см³, имеющая вид $D[\text{км/с}] = 3.71 + 1.24U$.

Содержание песка в тройной смеси варьировалось от 0 до 72 вес. %. Содержание воды оставалось постоянным и равным 14 вес. %. Результаты расчетов даны в табл. 1, где введены следующие обозначения: ρ_0 — начальная плотность смеси, D — скорость детонации, P — давление детонации, n — показатель политропы продуктов детонации, T — температура, V — удельный объем продуктов детонации, U — массовая скорость, Q — удельный тепловой эффект реакций химического превращения при замороженном составе продуктов детонации в расчете на килограмм смеси, f — сила пороха в расчете на 1 кг продуктов детонации, N_g — количество молей газообразных компонентов в одном килограмме продуктов химического превращения и V_g — объем газообразных компонентов в расчете на 1 кг смеси. Ниже приведен состав (в моль/кг) продуктов детонации (указаны лишь компоненты с содержанием выше 0.01 моль/кг):

| Смесь | Гексоген/вода 86/14 | Гексоген/вода/кварц 74/14/12 | Гексоген/вода/кварц 54/14/32 | Гексоген/вода/кварц 34/14/52 | Гексоген/вода/кварц 24/14/62 | Гексоген/вода/кварц 14/14/72 |
|--------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| [N ₂] | 10.6 | 10.25 | 9.63 | 8.4 | 7.26 | 5.22 |
| [H ₂ O] | 13.5 | 14.7 | 17.1 | 21.5 | 25.8 | 34.4 |
| [CO ₂] | 6.67 | 6.57 | 6.4 | 6.15 | 5.84 | 4.56 |
| [CO] | 4.11 | 3.87 | 3.36 | 2.27 | 1.24 | 0.1 |
| [H ₂] | 1.09 | 1.18 | 1.31 | 1.38 | 1.22 | 0.43 |
| [NH ₃] | 2.08 | 2.0 | 1.84 | 1.59 | 1.36 | 0.815 |
| [CH ₄] | 0.06 | 0.0 | 0.70 | 0.0 | 0.06 | 0.07 |

Таблица 1. Расчет параметров детонации смесей гексогена с песком, насыщенных 14% воды

| Смесь | ρ_0 , г/см ³ | D , км/с | P , ГПа | n | T , К | V_2 , см ³ /г | U , км/с | Q , мДж/кг | f , мДж/кг | N_{g^*} , моль/кг | V_{g^*} , л/кг |
|---------------------------------|---------------------------------|---------------|--------------|------|---------|-------------------------------|---------------|-----------------|-----------------|------------------------|---------------------|
| Гексоген/вода 86/14 | 1.62 | 7.92 | 23.3 | 3.36 | 3420 | 0.476 | 1.82 | 4.52 | 1.106 | 38.9 | 871 |
| Гексоген/вода/кварц 74/14/12 | 1.67 | 7.54 | 21.5 | 3.43 | 3400 | 0.464 | 1.69 | 3.8 | 1.07 | 39.4 | 777 |
| Гексоген/вода/кварц 54/14/32 | 1.77 | 6.84 | 18.1 | 3.6 | 3030 | 0.442 | 1.46 | 2.66 | 1.0 | 40.4 | 615 |
| Гексоген/вода/кварц 34/14/52 | 1.88 | 5.99 | 13.7 | 4.0 | 2600 | 0.425 | 1.17 | 1.51 | 0.872 | 42.1 | 453 |
| Гексоген/вода/кварц 24/14/62 | 1.94 | 5.45 | 11.0 | 4.34 | 2260 | 0.42 | 0.97 | 0.92 | 0.755 | 43.6 | 371 |
| Гексоген/вода/кварц 14/14/72 | 2.01 | 4.72 | 7.43 | 5.12 | 1700 | 0.423 | 0.66 | 0.31 | 0.515 | 46.5 | 292 |

Нами ниже будет показано, что рассчитанные скорости детонации находятся в близком согласии с измеренными значениями. Это позволяет использовать результаты расчетов, приведенные в табл. 1, для оценки других характеристик детонации, включая давление, теплоту взрыва, газообразование.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Полидисперсный гексоген заводского изготовления, который был использован в качестве взрывчатого компонента, имеет в основной массе размер частиц менее 0.2 мм. Фракционный состав, полученный путем отсева с помощью сит, приведен в табл. 2. Песок имел частицы размером 0.63–1.0 мм и был рассеян, так же как и гексоген, с помощью сит.

Для измерения скорости детонации использовались оболочки из дюралюминия длиной 200 мм, внешним диаметром 35 мм и диаметром канала 10 мм. По длине оболочки сверлили отверстия диаметром 1.5 мм с шагом в 20 мм. Для усиления свечения при детонации в отверстия вводили небольшое количество порошкообразного тэна. Скорость детонации измеряли с помощью скоростного ждущего фоторегистра ЖФР-3. Хорошо перемешанную смесь дисперсных компонентов заданного состава порционно засыпали в канал стоящей вертикально оболочки, затем с верхнего торца медленно заливали воду. Нижний торец оболочки закрывали полимерной пленкой и соединяли с водоструйным насосом. Когда на нижнем торце появлялась вода, заливку прекращали. Готовая смесь не имела заземленного воздуха, ее плотность равнялась теоретической максимальной. В зависимости от соотношения дисперсных компонентов смеси, содержание воды изменялось в диапазоне от 12 до 18 вес. %. Детонацию возбуждали с помощью капсуля-детонатора ЭД-8 и промежуточного детонатора из гексогена, который

вводили в верхнюю часть канала оболочки на глубину, равную диаметру канала.

Для определения критического диаметра детонации использовались оболочки с цилиндрическим и щелевым каналами ступенчатой формы. Определяющий размер (диаметр канала или раскрытие щели) оставался постоянным на длине 40–60 мм, затем уменьшался на 1 или 2 мм и т.д. Максимальное значение h 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. Исследуемый состав, хорошо перемешанный и насыщенный водой, равномерно заливали в нижнюю половину оболочки, плотно накрывали верхней ее половиной и скрепляли болтами. Детонацию также регистрировали фотографически через ряд отверстий в оболочке.

3. ОПЫТЫ В ОБОЛОЧКЕ С КАНАЛОМ ПОСТОЯННОГО ДИАМЕТРА

На рис. 1 для смеси гексоген/вода/песок состава 29/18/53 приведены фотография оболочки перед опытом (а), щелевая фоторегистрограмма (б) и фрагменты разрушенной оболочки после опыта (в). Кружки засветки от взрыва навесок тэна на рис. 1б, за исключением первой точки, строго ложатся на прямую линию, наклон кото-

Таблица 2. Фракционный состав гексогена

| Размер ячейки сита, мм | Остаток на сите, вес. % |
|------------------------|-------------------------|
| 0 | 32 |
| 0.05 | 46 |
| 0.16 | 10 |
| 0.2 | 5 |
| 0.32 | 7 |

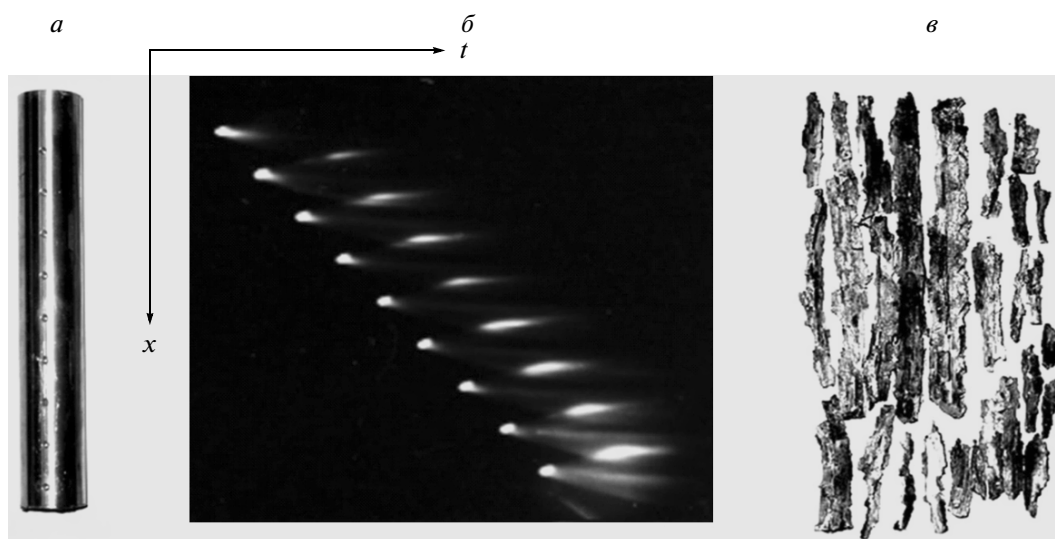


Рис. 1. Пример измерения скорости детонации для смеси гексоген/вода/песок состава 29/18/53 в оболочке из дюралюминия с цилиндрическим каналом диаметром 10 мм: *a* – фото оболочки до опыта, *б* – шелевая фоторазвертка, *в* – фрагменты разрушенной оболочки после опыта.

рой соответствует скорости детонации, равной 5350 м/с. Погрешность измерения скорости детонации не превышает 20 м/с.

Результаты измерения скорости детонации в зависимости от содержания гексогена в смеси представлены на рис. 2. В диапазоне концентраций снижаются от 74 до 22 вес. % скорость детонации снижается от 6.7 до 5.0 км/с. При содержании гексогена ниже 17 % детонация для данного диаметра заряда (10 мм) затухает.

Корреляционная зависимость скорости детонации от содержания гексогена (в вес. %) может быть представлена следующей формулой: $D[\text{км/с}] =$

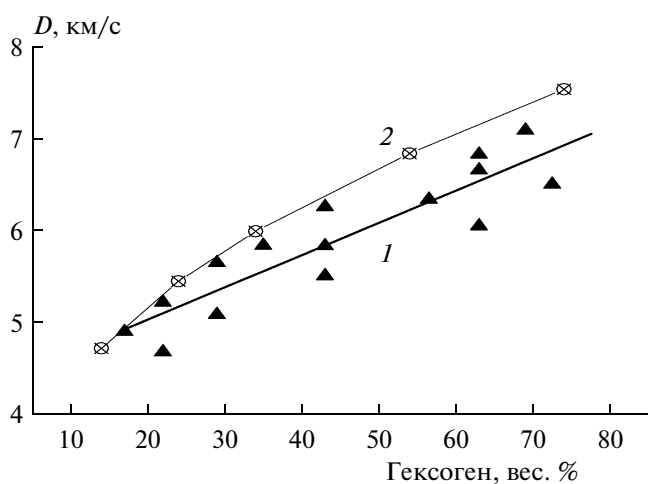


Рис. 2. Зависимость скорости детонации смесей гексоген/вода/песок от содержания гексогена: *1* – эксперимент в цилиндрической оболочке с каналом диаметром 10 мм; *2* – термодинамический расчет.

$= 4.33 + 0.035X$. Среднеквадратичное отклонение составило ± 0.25 км/с. Это достаточно большая величина, заметно превышающая погрешность измерения скорости детонации, что, впрочем, характерно для детонации гетерогенных смесей. На рис. 2 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 фракционного состава гексогена и размера частиц песка на скорость детонации. Результаты опытов приведены в табл. 3. С помощью сит из исходного гексогена была выделена фракция с размером частиц менее 0.2 мм. Другую фракцию составил крупнокристаллический гексоген с размером частиц 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. %. Для мелкой фракции гексогена в сочетании с песком основной фракции (0.63–1.0 мм) не обнаружено заметных отличий от основной серии опытов. При использовании более мелкой фракции песка детонационная способность исследуемых смесей снизилась: при содержании гексогена 43 вес. % и ниже детонация затухала. Впрочем, при более высоком содержании гексогена смесь детонировала со скоростью, не отличающейся от полученной в основной серии опытов.

Таблица 3. Зависимость скорости детонации водонаполненных смесей гексоген/песок от дисперсности гексогена и песка (цилиндрические оболочки внутренним диаметром 10 мм)

| Состав смеси гексоген/песок/вода | Размер частиц гексогена, мм | Размер частиц песка, мм | Результат | Скорость детонации, км/с |
|----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|--------------------------|
| 43/43/14 | 0.4–0.7 | 0.63–1 | – | |
| 50/34/16 | 0.4–0.7 | 0.63–1 | + | 4.45 |
| 56/26/18 | 0.4–0.7 | 0.63–1 | + | 5.92 |
| 43/43/14 | <0.2 | 0.63–1 | + | 5.75 |
| 43/43/14 | <0.2 | 0.25–0.4 | – | |
| 50/34/16 | <0.2 | 0.25–0.4 | + | 6.13 |
| 56/26/18 | <0.2 | 0.25–0.4 | + | 6.22 |

Примечание. “Плюс” – детонация, “минус” – затухание.

4. СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ СМЕСЕЙ ГЕКСОГЕНА С ПЕСКОМ В КАНАЛАХ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСКРЫТИЕМ

Для определения критических условий и выяснения поведения детонации в трещинах породы с уменьшающимся раскрытием были использованы оболочки со щелевыми каналами ступенчатой формы. Пример регистрации скорости детонации (б), совмещенный со схемой поперечного сече-

ния щелевого канала (а), для смеси состава 35/13/52 приведен на рис. 3. Щелевой канал имеет три секции с разным раскрытием. На начальном участке раскрытие равно 7 мм, затем оно уменьшается до 5 мм и, наконец, – до 3 мм. Несмотря на уменьшение раскрытия, детонация проходит по всей длине канала, сохраняя постоянную скорость, равную 5.22 км/с. Это значение скорости детонации немного ниже того, что было измерено для данного состава в цилиндрическом канале диаметром 10 мм. Следующий опыт с этим

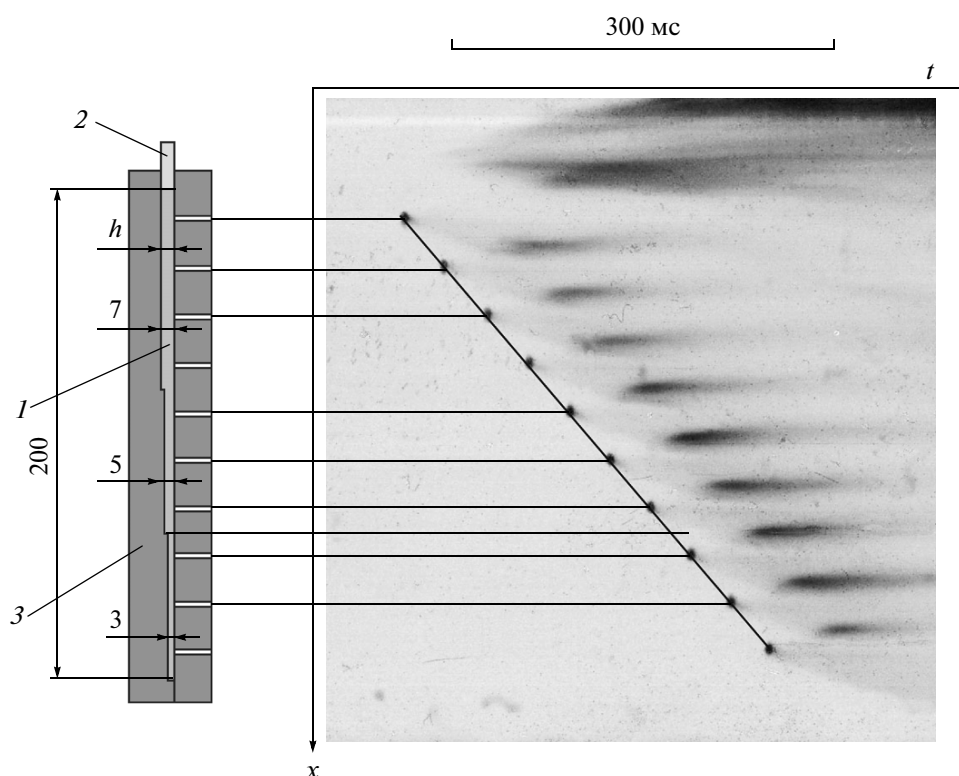


Рис. 3. Пример измерения скорости детонации (б) смеси гексоген/вода/песок состава 35/13/52 в щелевом канале (схема а) с уменьшающимся по длине раскрытием: 1 – исследуемая смесь, 2 – инициатор, 3 – плоская щелевая оболочка; размеры даны в мм.

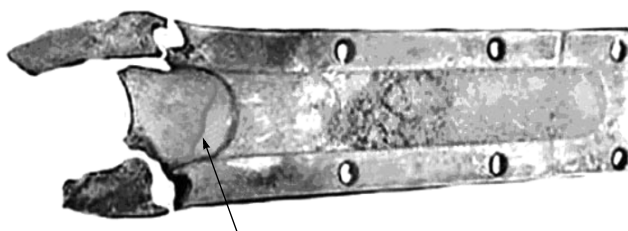


Рис. 4. Фотография нижней части щелевой оболочки, оставшейся целой после опыта со срывом детонации. Стрелка указывает место срыва детонации, справа от нее – остаток непрореагировавшей смеси.

составом был проведен в более узком щелевом канале, в котором расширение последовательно составило 4, 3 и 2 мм. Детонация прекратилась на конечном участке с расширением в 2 мм. Высветилось только первое из трех отверстий, относящихся к этой базе. Таким образом, срыв детонации происходит достаточно резко, критическим условиям соответствует раскрытие канала между 2 и 3 мм.

На рис. 4 приведена фотография канала нижней части щелевой оболочки, оставшейся целой после опыта, когда имел место срыв детонации. Можно видеть остатки смеси на участке, куда не дошла детонация. Отчетливо видно изменение состояния поверхности канала в месте затухания детонации с резким переходом от неровной, шероховатой поверхности к совершенно гладкой, отвечающей исходному состоянию канала.

Опыты со смесями с различным содержанием гексогена подтвердили общий результат: детонация в сужающемся канале протекает с постоянной скоростью, которая мало отличается от скорости детонации 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 его критического значения [7].

Данные по критическим условиям срыва детонации в щелевых каналах приведены в табл. 4. В опыте со смесью, содержащей 63 вес. % гексогена, детонация прошла с постоянной скоростью в 6.5 км/с по всей длине оболочки, последняя секция которой имела раскрытие 1 мм (минимальная величина раскрытия в данной серии опытов). Можно заключить, что для этого состава критический размер щелевого заряда < 1 мм. В этой же таблице приведены данные, полученные аналогичным образом на сужающихся каналах цилиндрической формы.

Поскольку предполагаемое место использования смесей – нефтеносные слои, температура которых выше нормальной температуры, была проведена серия опытов при повышенной начальной температуре – 90°C . 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 в несколько раз. Критические условия срыва детонации при $+90^{\circ}\text{C}$ в зависимости от содержания гексогена в смеси приведены в табл. 5. Видно, что смеси с содержанием гексогена 30 вес. % и выше имеют критическое раскрытие $h < 1$ мм. Граница для смесей, которые способны детонировать при $h = 10$ мм, снизилась с 17 до 13 вес. % гексогена. Отметим, что для жидких ВВ также наблюдается существенное снижение критического диаметра

Таблица 4. Критические условия срыва детонации в плоских (h_{cr}) и цилиндрических (d_{cr}) каналах для оболочек из дюралюминия

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

детонации с увеличением начальной температуры [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены экспериментальные исследования и термодинамические расчеты для детонации гексогенсодержащего водонасыщенного песка. Исследуемый материал 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 от 14 до 74 вес. %, от размера частиц гексогена, 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. Полидисперсный гексоген обеспечивает высокую детонационную способность смесей; фракции частиц гексогена в узком диапазоне размеров, в особенности гексоген с крупными частицами размером 0.4–0.7 мм, заметно повышают критический диаметр детонации. Повышение начальной температуры на 70°C в диапазоне от 20 до 90°C в несколько раз 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, в случае которых, как известно, скорость детонации практически не зависит от диаметра заряда вплоть до критического его значения. Кроме того, для жидких ВВ также наблюдается существенное снижение критического диаметра детонации с увеличением начальной температуры.

Термодинамические расчеты детонации взрывного проппанта проведены с использованием уравнения состояния BKWS. Расчеты велись в предположении, что песок является инертной добавкой, которая находится в механическом равновесии с продуктами детонации смеси гексоген + вода. Получено удовлетворительное согласие с экспериментом по скорости детонации и ее зависимости от содержания гексогена. Это дает основание

Таблица 5. Критические условия срыва детонации в плоских каналах для оболочек из дюралюминия при начальной температуре 90°C

| Состав смеси гексоген/вода/песок, вес. % | Критическое раскрытие плоской щели (мм) |
|--|---|
| 14/13/73 | $7 < h_{cr} < 10$ |
| 17/13/70 | $1 < h_{cr} < 2$ |
| 29/13/58 | $h_{cr} < 1.1$ |
| 43/14/43 | $h_{cr} < 1.1$ |

заключить, что гексоген в смеси с водонаполненным песком детонирует в пределах узкой зоны реакции без существенных потерь тепла на нагрев инертной добавки путем конвекции. Кроме того, 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 значения давлений детонации исследованных смесей, лежащие в диапазоне от 7.4 до 21.5 ГПа при содержании гексогена от 14 до 74 вес. %, можно рассматривать в целом как благоприятный фактор, способствующий трещинообразованию и интенсификации дроблению породы, окружающей трещину гидроразрыва.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Willberg D., Desroches J., Babour K. Mapping fracture dimensions. Patent US7134492, Nov. 14, 2006.
2. Boade R. Method of fracturing subsurface formations. Patent US4662451, May 5, 1987.
3. Афанасенков А.Н. // Взрывное дело № 68/25. М.: Недра, 1970. С. 48.
4. Ermolaev B.S., Khasainov B.A., Presles H.-N., Vidal P. // Proc. IV Sympos. on High Dynamic Pressures. Paris: CEA, 1995. P. 65.
5. Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1973.
6. Имховик Н.А., Соловьев В.С. // Вестн. МГТУ. Сер. Машиностроение. 1993. № 2. С. 53.
7. Юхансон К., Персон П. Детонация взрывчатых веществ. М.: Мир, 1973.
8. Беляев А.Ф., Курбангалина Р.Х. // ЖФХ. 1960. Т. 34. С. 603.