

**ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПРИМЕНЕНИЯ  
ТЕРМОСТОЙКОГО ВВ № 2  
ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

*А. Г. Струнина,  
В. Г. Абрамов, С. А. Ловля, В. А. Дементьев  
(Москва)*

С увеличением глубины нефтяных и газовых скважин меняются условия их бурения и эксплуатации. Для изделий, используемых при ликвидации аварий и вскрытии пласта, основанных на применении взрывчатых веществ [1], решающее значение приобретает рост забойной температуры и давления. Высокое гидростатическое давление заставляет увеличивать вес заряда для компенсации ослабленного в этих условиях действия взрыва на объект. Температура и давление, определяя скорость термического разложения и, следовательно, пределы самовоспламенения, ограничивают область использования ВВ, поскольку недопустимость произвольного, до спуска на заданный интервал, взрыва, как правило, с тяжелыми для скважин последствиями, очевидна.

Каковы давление и температура, с которыми встречаются или предстоит встретиться в ближайшее время нефтяникам, основным потребителям термостойких ВВ? За рубежом пройдены скважины на глубину  $\sim 8000$  м, в Советском Союзе — 6000 м. Соответственно температуры составляют 240 и 220°С, гидростатические давления 1300—1000 кгс/см<sup>2</sup>. Если исходить из максимальных геотермических градиентов, то на глубинах порядка 7000 м можно ожидать температур, близких к 350°С, вероятно лежащих у предела практического использования ВВ. Учитывая общую тенденцию к росту глубин бурения на нефть и газ, увеличение числа скважин с высокой (по крайней мере, 130—180°С) температурой, начало освоения геотепла и существование других областей применения термостойких ВВ, поиск правильных условий их использования нужно отнести к проблемам, приобретающим большой интерес.

В задачу работы входило исследование характеристик теплового взрыва с определением взрывчатых свойств после термостатирования зарядов одного из термостойких ВВ — № 2 (название условное). Нашлись характеристики процесса, которые существенны для производственного применения вещества.

Тепловое самовоспламенение возникает в случае, когда тепло реакции разложения не успевает отводиться из заряда, вызывая ускорение реакции и саморазогрев. В основе теории лежит рассмотрение соотношения между тепловыделением за счет химической реакции и теплоотводом [2]. Задача сводится к совместному решению системы уравнений химической кинетики и теплопередачи и описывает пространственное и временное распределение температур и скоростей реакции.

В теории рассматриваются:

1. Критическое условие — связь между параметрами системы (температура окружающей среды  $T_0$ , диаметр заряда  $d$ , условия теплообмена заряда с окружающей средой), разграничивающее спокойное выгорание всего вещества с небольшим разогревом и существенно нестационарное (с воспламенением) его превращение. Критическое условие теплового взрыва можно записать в виде

$$d_*^2 = a \varphi(Bi) T_0^2 \exp(E/RT_0),$$

где  $a$  — параметр, характеризующий теплофизические свойства вещества;

$$\varphi(Bi) = \frac{Bi}{2} [\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi] \exp \frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi} -$$

— функция, позволяющая судить о зависимости критического условия от теплообмена образца с окружающей средой [3, 4]; критерий  $Bi = \frac{\alpha d}{2\lambda}$  характеризует условия теплообмена;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности образца в окружающую среду;  $d, d_*$  — диаметр образца и его критическое значение;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности образца.

2. Период индукции самовоспламенения  $t_{инд}$ . Критическое значение периода индукции  $t_*$  связано с температурой  $T_0$  формулой  $t_* = b \exp(E/RT_0)$ , над пределом —  $t_{инд} = t_* f\left(\frac{d}{d_*}\right)$  [5], где  $b$  — параметр, характеризующий свойства вещества.

3. Глубина предвзрывного разложения  $\eta_+$  (глубина превращения вещества за период индукции). Величина  $\eta_+$  определяется в основном кинетическими особенностями исследуемой системы. Так, для неавтокаталитических реакций  $\eta_+$  мала (проценты), для реакций автокаталитических  $\eta_+$  может достигать больших значений.

Рассмотренные выше характеристики позволяют выбирать условия применения взрывчатого вещества при повышенных температурах.

Опыты ставились следующим образом. Исследуемый заряд помещался в термостатирующий реакционный сосуд. Между поверхностью образца и стенкой оставлялся зазор шириной  $0,1d$ , заполненный песком, обеспечивавший выход газообразных продуктов разложения. С помощью термопары измерялся и фиксировался потенциометром ЭПП-09 разогрев системы. В каждом сосуде по методу регулярного режима определялся эффективный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  [6]. Критерий Био выдерживался равным  $\sim 5,5$ . Время от начала термостатирования (подачи теплоносителя с температурой  $T_0$  в рубашку сосуда) до достижения центром заряда температуры  $T_0$  принималось за время прогрева. Период индукции отсчитывался с момента прогрева заряда. За критическую температуру самовоспламенения ( $T_*$ ) принималось среднее значение между максимальной температурой ( $T_1$ ), соответствующей спокойному разложению системы, и минимальной ( $T_2$ ), при которой происходит воспламенение, за критический период индукции ( $t_*$ ) — среднее значение между периодом индукции при  $T=T_2$  и временем достижения максимального разогрева в системе при  $T=T_1$ .

Конечно, условия, рассмотренные выше, иные, чем в скважинах. Основное отличие заключается в том, что в скважине ВВ контактирует

с жидкостью, заполняющей ствол, находящейся, как правило, под высоким гидростатическим давлением. Поскольку компоненты жидкости (главным образом, глинистый раствор) от скважины к скважине, а иногда даже в пределах одной скважины меняются, найти универсальную среду, которая была бы эталоном раствора, невозможно. Но общим для

Таблица 1  
Экспериментальные значения критических диаметров самовоспламенения и периодов индукции

| $T^{\circ}, C$ | $d_*, см$ | $t_*, ч$ |
|----------------|-----------|----------|
| 177            | 1,6       | 58,2     |
| 171            | 2         | 88,9     |
| 158            | 3         | 258,5    |

растворов является их щелочная реакция, и можно предположить, что сам по себе контакт вещества с раствором не будет существенно влиять на термостойкость, а, возможно, нейтрализуя кислые продукты разложения, стабилизирует процесс. Давление же, несомненно может снижать критическую температуру, если газообразные продукты разложения ВВ обладают каталитическим действием на процесс.

При определении критических температур использовались заряды диаметром 1,6; 2,0; 3,0 см (табл. 1). Для больших диаметров этот параметр не определялся из-за длительности периодов индукции, достигающих сотен часов.

Данные табл. 1 хорошо описываются уравнениями:

$$d_*^2 = 1,6 \cdot 10^{-20} T_0^2 e^{\frac{30600}{RT_0}} \text{ см}, \quad (1)$$

$$t_* = 7,2 \cdot 10^{-14} e^{\frac{30600}{T_0}} \text{ ч}. \quad (2)$$

Для использования при других условиях теплообмена выражение (1) целесообразно представить в виде

$$d_*^2 = 2,2 \cdot 10^{-20} \varphi(Vi) T_0^2 e^{\frac{30600}{RT_0}} \text{ час}. \quad (3)$$

Выражение (2) с изменением  $Vi$  не меняется [7].

При исследовании закономерностей изменения периода индукции в области надкритических температур использовались заряды с диаметрами, равными 1,6; 2; 3; 4,2; 5; 8,4 см. Большая часть из них выполнена при температурах, не превышающих 185—187° (табл. 2). Используя данные табл. 2, на рис. 1 представлена связь периодов индукции с диаметром заряда, хорошо описываемая формулой

$$t/t_* = 4,5 e^{-1,33(d/d_*)}. \quad (4)$$

Кривые разогрева образцов во времени изображены на рис. 2. Их вид свидетельствует о том, что термическое разложение состава № 2 является самоускоряющимся процессом, для которого характерны большие периоды индукции и глубины превращения к моменту воспламенения. В области критических температур на кривой разогрев — время отмечено существование двух максимумов. Как правило, все образцы спокойно выгорали, и реакционный сосуд оставался целым. Лишь в опыте с зарядом диаметром 8,4 см наблюдался переход горения в детонацию и дробление сосуда. Но, поскольку опыты ставились в усло-

Таблица 2

Зависимость периодов индукции от температуры для разных диаметров зарядов (Bi=5,5)

| $d, \text{ см}$ | $T_0, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_{\text{инд}}, \text{ ч}$ | $\frac{t_{\text{инд}}}{t_*}$ | $\frac{d}{d_*}$ | $d, \text{ см}$ | $T_0, \text{ }^\circ\text{C}$ | $t_{\text{инд}}, \text{ ч}$ | $\frac{t_{\text{инд}}}{t_*}$ | $\frac{d}{d_*}$ |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|
| 8,4             | 175                           | 1,4                         | —                            | —               | —               | —                             | —                           | —                            | —               |
| 5,0             | 154                           | 259,0                       | 0,72                         | 1,31            | 3,0             | 160                           | 206,0                       | 0,97                         | 1,00            |
|                 | 157                           | 177,0                       | 0,62                         | 1,49            |                 | 165                           | 121,0                       | 0,85                         | 1,21            |
|                 | 160                           | 114,6                       | 0,51                         | 1,66            |                 | 170                           | 60,3                        | 0,60                         | 1,42            |
|                 | 164                           | 54,0                        | 0,34                         | 1,90            |                 | 180                           | 12,6                        | 0,28                         | 2,14            |
|                 | 166                           | 43,6                        | 0,31                         | 2,04            | 2,0             | 172                           | 82,0                        | 1,00                         | 1,06            |
|                 | 170                           | 21,6                        | 0,22                         | 2,38            |                 | 176                           | 47,5                        | 0,78                         | 1,22            |
|                 | 173                           | 12,3                        | 0,17                         | 2,80            |                 | 180                           | 25,6                        | 0,52                         | 1,43            |
|                 | 176                           | 4,5                         | 0,07                         | 2,95            |                 | 185                           | 13,3                        | 0,41                         | 1,74            |
| 178             | 1,5                           | 0,03                        | 3,57                         | 189             |                 | 3,5                           | 0,27                        | 2,00                         |                 |
| 180             |                               |                             |                              | 190             |                 | 1,75                          | 0,09                        | 2,04                         |                 |
| 4,2             | 152                           | 352,0                       | 0,78                         | 0,98            | 1,6             | 178                           | 52,5                        | 0,99                         | 1,05            |
|                 | 156                           | 240,0                       | 0,75                         | 1,15            |                 | 180                           | 40,0                        | 0,88                         | 1,14            |
|                 | 162                           | 101,2                       | 0,52                         | 1,47            |                 | 185                           | 15,3                        | 0,66                         | 1,54            |
|                 | 166                           | 68,2                        | 0,49                         | 1,71            |                 | 190                           | 6,0                         | 0,29                         | 1,63            |
|                 | 170                           | 29,2                        | 0,29                         | 2,00            | 195             | 0,6                           | 0,04                        | 1,90                         |                 |
|                 | 175                           | 14,6                        | 0,23                         | 2,44            |                 |                               |                             |                              |                 |
|                 | 176                           | 7,2                         | 0,12                         | 2,48            |                 |                               |                             |                              |                 |
|                 | 178                           | 3,9                         | 0,07                         | 2,76            |                 |                               |                             |                              |                 |
| 182             | 1,2                           | 0,03                        | 3,23                         |                 |                 |                               |                             |                              |                 |

виях свободного газоотвода, нельзя считать, что в скважине тепловое самовоспламенение небольших зарядов торпеды ограничится спокойным выгоранием вещества.

По формулам (2)—(4) в данных условиях теплоотвода можно рассчитать время, через которое образец определенного диаметра, находящийся при температуре  $T_0$  (температура окружающей среды), самопроизвольно воспламенится. С этой целью для выбранной температуры  $T_0$

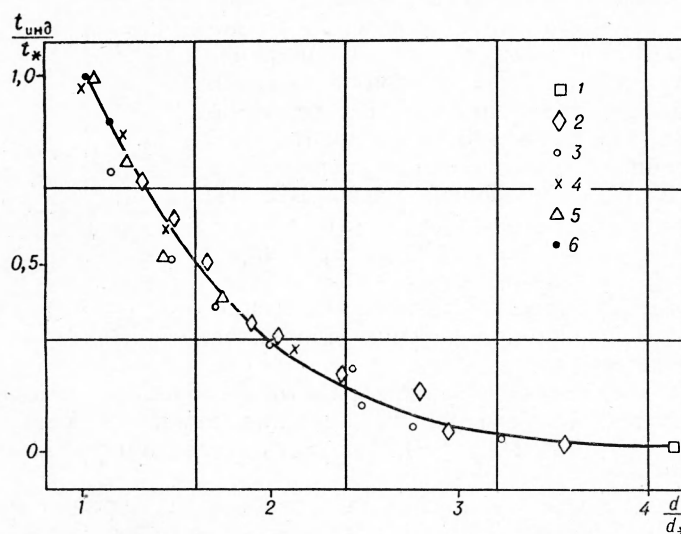


Рис. 1. Зависимость периода индукции от температуры и диаметра заряда.  
 1 —  $d=8,4 \text{ см}$ ; 2 —  $d=5 \text{ см}$ ; 3 —  $d=4,2 \text{ см}$ ; 4 —  $d=3 \text{ см}$ ; 5 —  $d=2 \text{ см}$ ; 6 —  $d=1,6 \text{ см}$ .

по формулам (2) и (3) определяются критические диаметры ( $\bar{a}_*$ ) и период индукции ( $t_*$ ), а по формуле (4) —  $t$  индукции. По изложенной схеме была произведена оценка верхней температурной границы применения зарядов, за которую принималась температура, когда образец не воспламенялся в течение 6 ч. Расчет проведен при опытном значении  $Vi = 5,5$ <sup>1</sup>. Результаты расчета и опытные данные приведены в табл. 3.

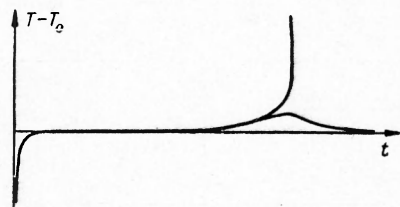


Рис. 2. Развитие разогрева в заряде.

Пользуясь формулами (2)–(4), в частности, можно оценить снижение термостойкости заряда с ростом его диаметра, что в ряде случаев очень существенно. При работе в скважинах эта верхняя температурная граница, естественно, будет снижена, учитывая возможное отрицательное влияние на процесс высокого давления, контакта вещества с жидкостью и необходимость введения поправки на неточное определение истинной температуры в стволе.

В условиях глубоких скважин с вязким глинистым раствором спуск торпеды может происходить медленно, растягивая время прогрева взрывчатого вещества, а иногда, при осложнениях, сопровождается длительными остановками заряда в зоне высоких температур. Не исключено возвращение на дневную поверхность отказавших торпед. Для успешного выполнения комплекса работ по торпедированию полезно знать, как сказывается на поведении взрывчатых веществ время их термостатирования и в какой мере этот фактор влияет на опасность обращения с отказавшей торпедой. Были поставлены опыты по определению относительной работоспособности, скорости детонации и чувствительности к удару у образцов, термостатированных в разное время при постоянной температуре (рис. 3). Работоспособность замерялась по расширению полости свинцовой бомбы при взрыве, изменение веса — взвешиванием зарядов до и после термостатирования. За единицу брались расширение полости при взрыве и вес нетермостатированного заряда. Для сравнения на этом же рисунке представлена зависимость относительной работоспособности от количества инертной добавки (талька), заменяющей часть ВВ. Из опытов следует, что даже при достаточно глубоком термостатировании ( $t/t_{\text{инд}} \approx 0,7$ ) заряд сохраняет удовлетворительную работоспособность и что термическое разложение сопровождается образованием летучих продуктов, удаляемых из заряда.

Параллельно с уменьшением работоспособности термостатированных зарядов тех же размеров наблюдалось заметное уменьшение скорости детонации. Для  $t/t_{\text{инд}} \approx 0,7$  скорость детонации уменьшается примерно на 10%.

Чувствительность к удару термостатированных зарядов проверялась на копре в стандартных условиях. Оказалось, что после термостатиро-

Таблица 3

Расчетные и опытные значения верхней температурной границы применения зарядов

| d, см | T <sub>0</sub> , °C |        |
|-------|---------------------|--------|
|       | опыт                | расчет |
| 1,6   | 190                 | 190,5  |
| 2,0   | 187                 | 187,0  |
| 3,0   | —                   | 180,5  |
| 4,2   | 176,5               | 174,5  |
| 5,0   | 175                 | 171,0  |
| 6,5   | —                   | 166,5  |
| 8,4   | —                   | 162,0  |

<sup>1</sup> При практическом использовании зарядов  $Vi$  гораздо больше, но изменение  $Vi$  с 5,5 до  $\infty$  сопровождается повышением границы применения заряда на 2–3°С.

вания (при  $t/t_{\text{инд}} \approx 0,8$ ) чувствительность к удару возрастает до 80—95% при исходном значении ее  $\sim 50\%$  взрывов.

Для уточнения возможности повторного использования торпед с зарядами из системы № 2 были поставлены опыты с искусственным прерыванием термостатирования (по истечении некоторого времени  $t_1 < t_{\text{инд}}$ ).

Опыты проводились на зарядах  $d = 42$  мм при температурах 180 и 175°С и разных временах  $t_1$ . Оказалось, что вещество № 2 обладает «эффектом памяти», т. е. при повторном термостатировании время, через которое наступает самовоспламенение, равно:

$$t_2 = t_{\text{инд}} - t_1,$$

где  $t_{\text{инд}}$  — период индукции при этой температуре, определяемой выражением (4). Поэтому повторное использование торпеды будет усложнено повышением опасности обращения с ней, снижением эффективности и сокращением времени, в течение которого торпеда сможет находиться в скважине.

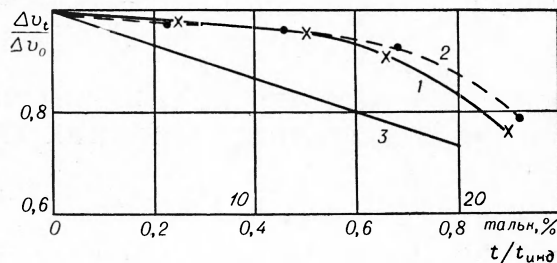


Рис. 3. Зависимость относительной работоспособности (1) и относительного веса (2) от времени термостатирования. Изменение относительной работоспособности (3) с увеличением инертной добавки.

## ВЫВОДЫ

1. При определенных условиях опыта получены формулы для расчета безопасных температур применения зарядов системы № 2, формулы для расчета периодов индукции зарядов системы № 2 при любых температурах.
2. Предварительные опыты показали, что исследуемая взрывчатая система обладает «эффектом памяти».
3. Обнаружено, что с увеличением времени пребывания зарядов в скважине их энергия взрыва уменьшается, скорость детонации уменьшается, чувствительность к удару возрастает.
4. Полученные данные могут быть полезны для определения режимов применения ВВ при повышенных температурах в практических условиях.

Поступила в редакцию  
21/VII 1965

## ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Ловля, Л. А. Горбенко, Б. Л. Каплан. Торпедирование и перфорация скважин. М., Гостоптехиздат, 1959.
2. Н. Н. Семенов. Цепные реакции. Л., ОНТИ, 1934.
3. Д. А. Франк-Каменецкий. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. Изд-во АН СССР, 1947.
4. В. В. Барзыкин, А. Г. Мержанов. Докл. АН СССР, 1958, 120, 1271.
5. В. В. Барзыкин, В. Т. Гонтковская, А. Г. Мержанов, С. И. Худяев. ПМТФ, 1964, 3.
6. Г. М. Кондратьев. Тепловые измерения. Машгиз, 1957.
7. С. И. Худяев. Научно-технические проблемы горения и взрыва, 1965, 1.