

УДК 544.452

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ДЕТОНАЦИИ НА УГЛАХ ПОВОРОТА В КАНАЛАХ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ

Е. В. Халдеев, А. В. Бессонова, Д. А. Пронин, Ю. М. Сустаева,  
О. В. Шевлягин

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, Институт экспериментальной газодинамики и физики взрыва  
607190 Саров, ev.haldeev@mail.ru

В современных условиях все большее значение приобретает возможность компьютерного моделирования поведения изделий, содержащих взрывчатые вещества, на различных стадиях их жизненного цикла. Для верификации расчетных методик были проведены исследования процесса распространения детонационной волны в каналах модельных распределителей с использованием современного метода высокоскоростной фотосъемки. В данной работе особое внимание уделено движению детонационной волны на поворотах канала и образованию «темных зон». Представлены результаты, полученные с помощью электронно-оптического комплекса NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная камера НАНОГЕЙТ 22 с частотой съемки до  $10^9$  кадр/с. При съемке с временем экспозиции 20 нс и межкадровым интервалом 80 нс впервые получена визуализация положения детонационного фронта при движении его в поворотах под углом 60, 90 и  $120^\circ$ .

Ключевые слова: взрывчатые вещества, детонационная волна, канал с поворотами, «темная зона».

DOI 10.15372/FGV20180517

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в расчетных методиках РФЯЦ-ВНИИЭФ используется метод прямого численного моделирования работы каналов с поворотами, снаряженных взрывчатым веществом (ВВ) [1], который позволяет описывать результаты модельных экспериментов по исследованию распространения и прерывания детонации в каналах, снаряженных ВВ (как прямолинейных, так и с поворотами), с учетом кинетики детонации.

Исследования распространения детонации в области поворота канала, снаряженного ВВ, ведутся давно. Так, в работе [2] съемкой с помощью скоростного фоторегистратора СФР было показано, что по каналу с поворотами под углом  $90^\circ$ , снаряженным ВВ на основе гексогена (ТГ 50/50, ТГ 20/80, пластическое ВВ на основе гексогена), детонация распространяется по пути, отличному от кратчайшего. На полученных кадрах замечены «темные зоны», которые были идентифицированы как участки с непрореагировавшим ВВ. В данной работе образование «темной зоны» связывается с тем, что дав-

ление детонационной волны (ДВ) на участок ВВ, находящийся за поворотом, относительно невелико и детонация там возникает с некоторой задержкой. За время задержки детонации взрывчатое вещество на внутренней части канала успевает разгрузиться и поэтому не реагирует — имеет место «темная зона».

Исследованию распространения детонации в каналах, снаряженных пластическим ВВ на основе тэна, посвящено немало работ [3, 4 и т. д.]. Тем не менее до сих пор остаются недостаточно исследованными вопросы возникновения и размера области «темной зоны» в таких каналах. Связано это со сложностью и невысоким качеством регистрации «темных зон» в каналах малого сечения (от  $1.2 \times 1$  до  $1.5 \times 1.5$  мм), снаряженных пластическим ВВ на основе тэна, проводимой с помощью растровой съемки СФР.

Использование электронно-оптического комплекса NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная камера НАНОГЕЙТ 22 с частотой съемки до  $10^9$  кадр/с [5], позволяет визуализировать распространение детонационных и ударных волн на любом этапе их зарождения и развития.

Целью настоящей работы является исследование распространения детонационной волны на различных углах поворота каналов, снаряженных пластическим ВВ на основе тэна, с использованием современного метода высокоскоростной видеосъемки. Задача исследования — выявить наличие или отсутствие «темных зон» в области поворота каналов. Актуальность настоящей работы определяется необходимостью получения данных для прямого численного моделирования работы каналов с поворотами, снаряженных пластическим ВВ на основе тэна, а также для разработчиков устройств взрывной логики и других прецизионных взрывных устройств.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве объекта испытаний был использован макет, изготовленный из пенопласта ПС-1-600 толщиной 20 мм с каналом, сечения которого выбраны в трех вариантах: ширина 1.2 мм, глубина 1 мм; ширина 1.5 мм, глубина 1.2 мм; ширина 1.5 мм, глубина 1.5 мм. Углы поворота каналов — 60°, 90° и 120°. Канал макета был снаряжен пластическим ВВ на основе тэна. Эскиз (угол поворота 90°) и внешний вид макетов (угол поворота 120°, 60°) представле-

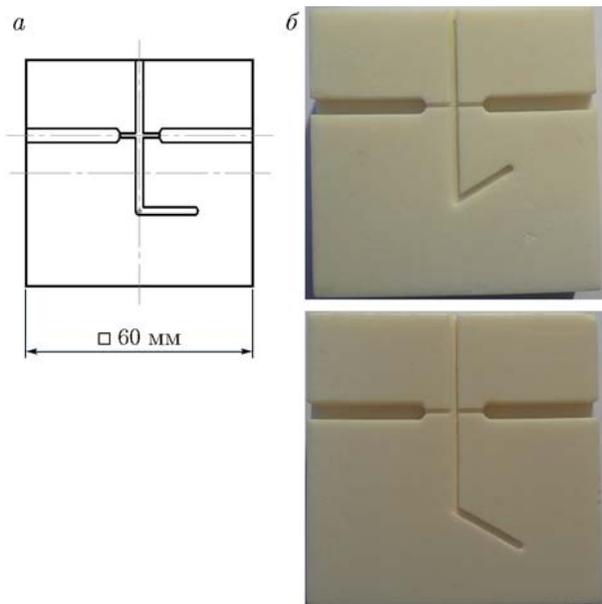


Рис. 1. Эскиз и внешний вид макетов с углами поворота 90°, 120°, 60°:

*a* — эскиз макета с углом поворота канала 90°,  
*б* — внешний вид макетов с углом поворота 120°, 60°

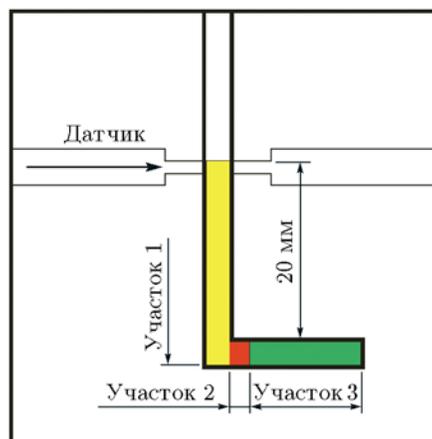


Рис. 2. Схема модельной сборки с указанием местоположения контакта для запуска камеры НАНОГЕЙТ 22

ны на рис. 1.

Запуск камеры осуществлялся по срабатыванию волоконно-оптического датчика, установленного в пазе конструкции макета (рис. 2). Время экспозиции кадра во всех опытах составляло 20 нс, межкадровое расстояние ≈ 80 нс.

Для удобства описания процесса распространения ДВ в канале макета канал разбили на три участка (см. рис. 2):

участок 1 — весь прямолинейный участок от паза для установки оптического датчика до конца канала;

участок 2 — область части канала за поворотом (область с вероятным образованием «темной зоны») длиной 2 ÷ 4 мм;

участок 3 — оставшийся прямолинейный участок канала за поворотом.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

### 2.1. Канал с углом поворота 90°

Рассмотрим движение ДВ в канале с наиболее характерным значением угла поворота 90°. Кадры распространения ДВ в каналах сечением 1.2 × 1.0, 1.5 × 1.2, 1.5 × 1.5 мм представлены на рис. 3.

На полученных изображениях видно, что на протяжении участка 1 до угла поворота детонационный фронт движется вдоль оси канала. При достижении угла поворота наблюдается «проскок» детонации, т. е. дальше ДВ движется по участку 1 без вхождения на участок 2.

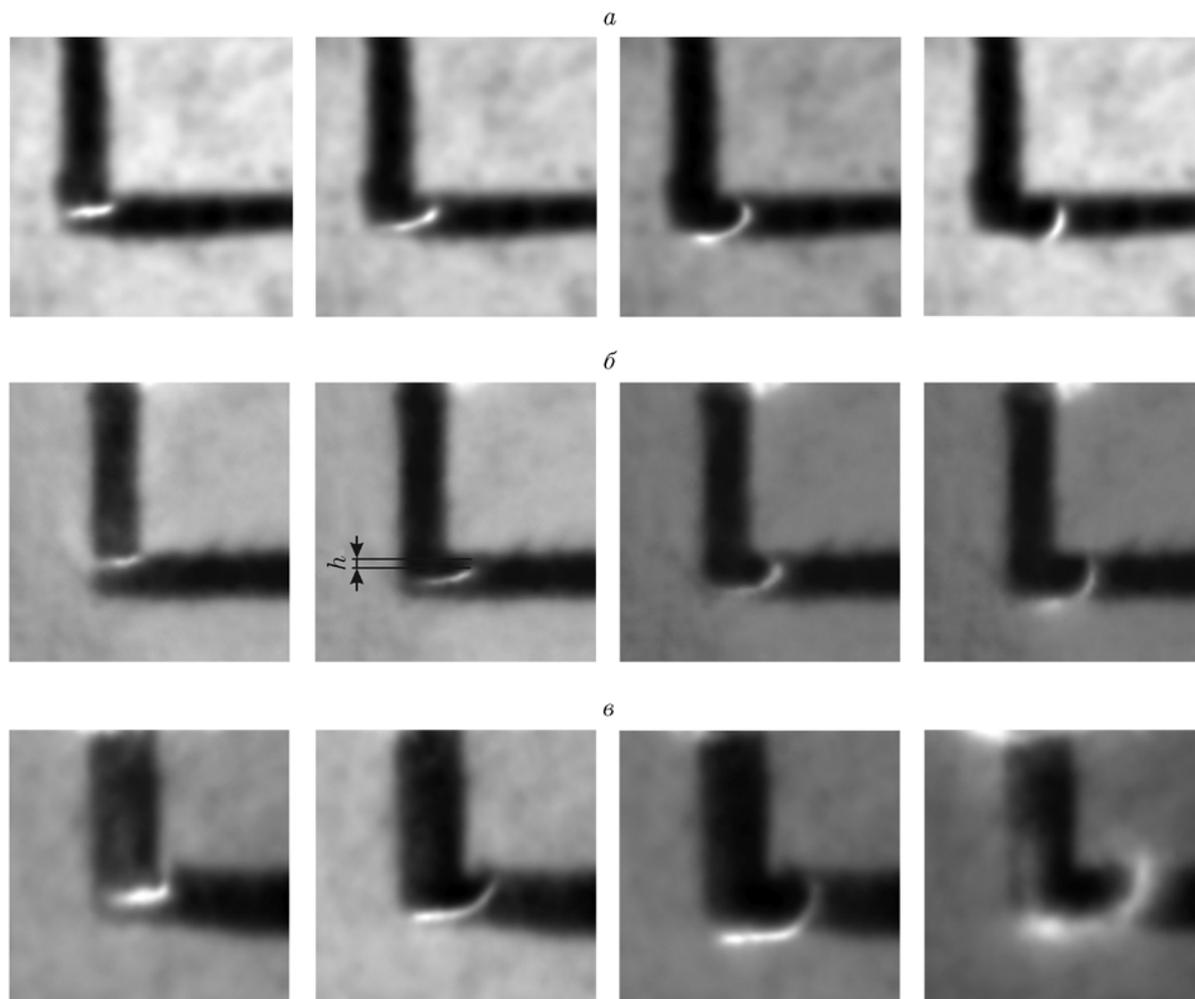


Рис. 3. Кадры распространения ДВ в канале с углом поворота  $90^\circ$ :  
 а — сечение  $1.2 \times 1.0$  мм, б — сечение  $1.5 \times 1.2$  мм, в — сечение  $1.5 \times 1.5$  мм

Размер зоны «проскока» детонации ( $h$ ), вероятнее всего, определяется детонационными характеристиками ВВ [3] и для угла  $90^\circ$  равняется  $h = 0.3 \div 0.5$  мм от внутреннего угла. После «проскока» детонации в области поворота на участке 2 происходит инициирование ВВ, при этом по участку 2 начинает распространяться расходящаяся детонационная волна, фронт ДВ, движущийся по участку 1, приобретает некоторый наклон. Качественная оценка показала, что по внешней стороне канала за поворотом ДВ распространяется с большей скоростью, чем по внутренней. На участке 3 фронт расходящейся ДВ, имеющий первоначально изгиб, выравнивается и становится плоским. ДВ после поворота распространяется под некоторым углом к нормали, изменяющимся от  $\approx 45^\circ$  вблизи поворота до  $\approx 75^\circ$  на расстоянии  $1.5 \div 2.5$  мм

от угла.

Видимых (очевидных) областей с «темными зонами» — областей с непрореагировавшим ВВ в каналах — не обнаружено. Свечение на фронте ДВ зарегистрировано по всей области возможного образования «темной зоны». Для иллюстрации областей с отсутствием свечения ДВ, которые были идентифицированы как «темные зоны», на рис. 4 представлены снимки, демонстрирующие области с «темными зонами» в каналах сечением  $3 \times 3$  мм, снаряженных пластическим ВВ на основе гексогена.

## 2.2. Канал с углом поворота $120^\circ$

Кадры распространения ДВ в канале сечением  $1.5 \times 1.2$  мм приведены на рис. 5. Видно, что на протяжении участка 1 до угла по-

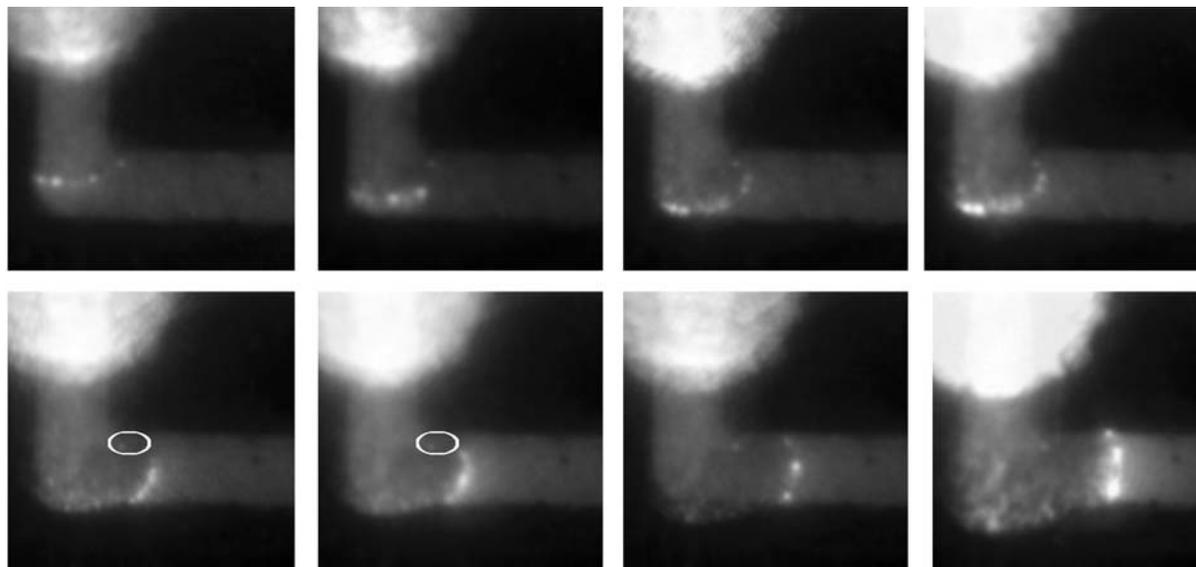


Рис. 4. Распространение ДВ в канале макета с углом поворота  $90^\circ$ , снаряженном пластическим ВВ на основе гексогена, с выделенными «темными зонами» (съемка камерой НАНОГЕЙТ 22)

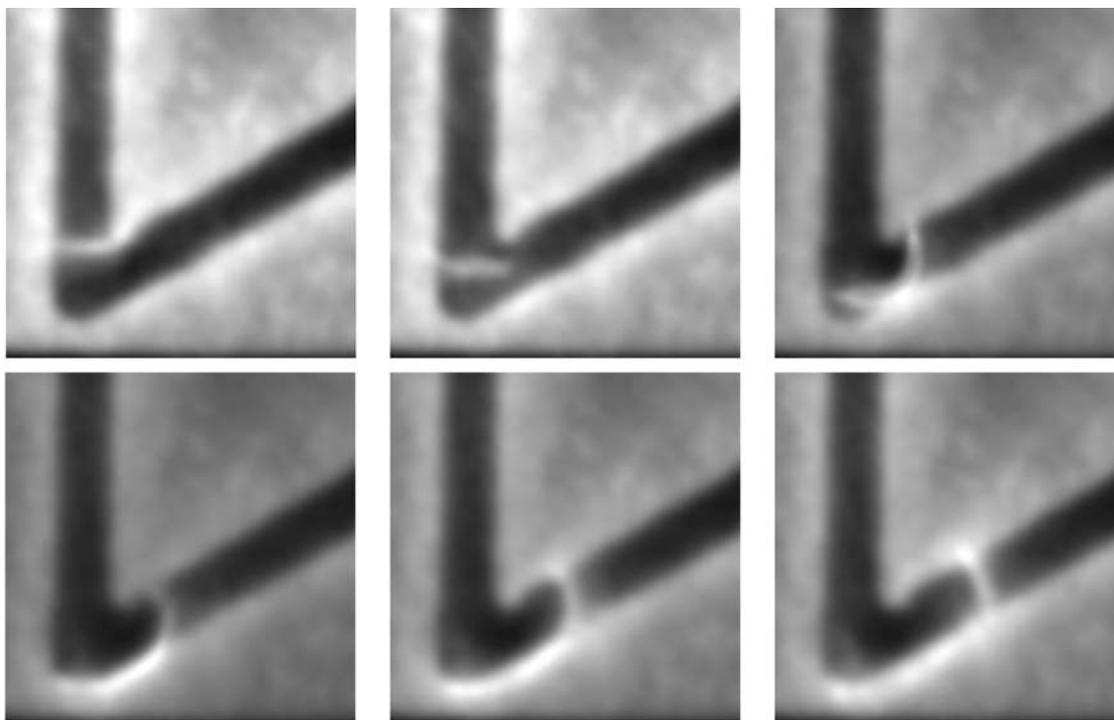


Рис. 5. Распространение ДВ в канале сечением  $1.5 \times 1.2$  мм с углом поворота  $120^\circ$

ворота детонационный фронт остается плоским. При достижении угла поворота наблюдается «проскок» детонации, величина которого равна примерно половине ширины канала:  $h = 0.6 \div 0.8$  мм. На кадрах в области вблизи угла поворота во внутренней части канала отсутствует свечение фронта ДВ. Исходя из это-

го, можно предположить, что в угле поворота происходит образование «темной зоны». Дальнейшее распространение детонации в пластическом ВВ на основе тэна в каналах за углом поворота  $120^\circ$  осуществляется аналогично распространению ДВ в каналах с поворотом под углом  $90^\circ$ .

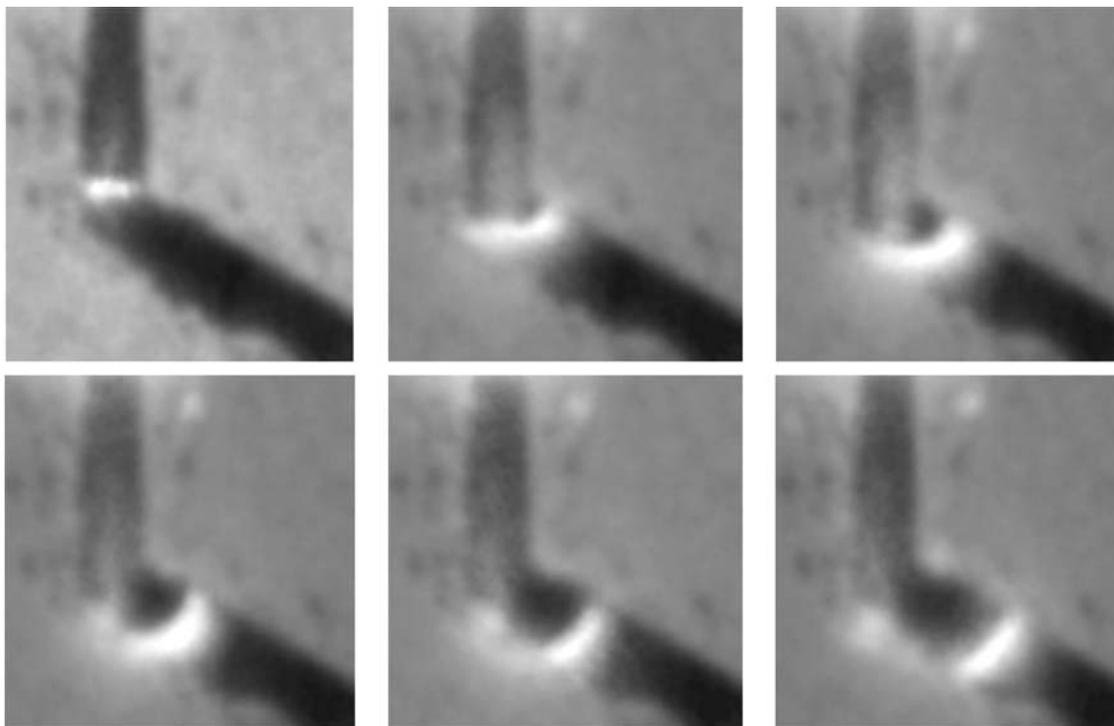


Рис. 6. Распространение ДВ в канале сечением  $1.5 \times 1.2$  мм с углом поворота  $60^\circ$

### 2.3. Канал с углом поворота $60^\circ$

Кадры распространения ДВ в канале сечением  $1.5 \times 1.2$  мм представлены на рис. 6. Видно, что распространение детонации в пластическом ВВ на основе тэна в каналах с углом поворота  $60^\circ$  осуществляется аналогично распространению ДВ в каналах с поворотом под углом  $90^\circ$ : «проскок» детонации в области поворота на  $60^\circ$  не наблюдается, видимых (очевидных) областей с «темными зонами» не обнаружено.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование с использованием камеры НАНОГЕЙТ 22 процесса распространения детонационной волны в углах поворота  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$  в каналах сечением  $1.2 \times 1$ ,  $1.5 \times 1.2$  и  $1.5 \times 1.5$  мм, снаряженных пластическим ВВ на основе тэна, показало, что характер распространения детонации во всех случаях примерно одинаков:

- на первоначальном прямолинейном участке канала до угла поворота фронт ДВ плоский;
- при достижении угла поворота происходит «проскок» детонации, составляющий  $h =$

$0.6 \div 0.8$  мм в каналах с углом поворота  $120^\circ$  и  $h = 0.3 \div 0.5$  мм в каналах с углом поворота  $90^\circ$ , в области поворота на  $60^\circ$  «проскок» не наблюдается;

- после «проскока» детонации в области угла поворота происходит инициирование ВВ, при этом начинает распространяться расходящаяся детонационная волна, фронт ДВ, движущийся по прямолинейному участку за поворотом, приобретает некоторый наклон;
- по внешней стороне канала за его поворотом ДВ распространяется с большей скоростью, чем по внутренней;
- в начале участка за поворотом канала фронт расходящейся ДВ, имеющий первоначально изгиб, начинает выравниваться и становится плоским. Детонационная волна вблизи поворота распространяется под углом  $\approx 45^\circ$  к нормали и по мере движения по каналу стремится к  $90^\circ$ .

Видимых (очевидных) областей с «темными зонами» в каналах с углами поворота  $90^\circ$  и  $60^\circ$  не обнаружено. В области поворота канала с углом  $120^\circ$  происходит образование «темной зоны».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Морозов В. Г., Карпенко И. И., Дмитриева Л. В. и др. Модель ударно-волновой чувствительности ВВ с учетом предварительного ударного нагружения и разгрузки. Современное состояние // IX Харитоновские тематические научные чтения: тр. междунар. конф. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. — С. 210–214.
2. Новиков С. А., Шутов В. И. О распространении детонации в полосе, имеющей углы поворота // Физика горения и взрыва. — 1980. — Т. 16, № 3. — С. 153–154.
3. Андреевских Л. А., Фомичева Л. В., Хабаров И. П. Практический способ контроля детонационного сечения повышенной точности // XII Симпозиум по горению и взрыву. — 2000. — С. 115–117.
4. Кобылкин И. Ф., Носенко Н. И. Распространение детонационных волн в зарядах ВВ с угловыми границами // Хим. физика. — 1998. — Т. 17, № 1.
5. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22. Руководство по эксплуатации. — М., 2012.

*Поступила в редакцию 21/VI 2018 г.*

---