

УДК 554.452

# Распространение детонации на углах поворота в каналах с малым сечением

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

*В современных условиях все большее значение приобретает возможность компьютерного моделирования поведения изделий, содержащих взрывчатые вещества (ВВ), на различных стадиях их жизненного цикла. Для верификации расчетных методик были проведены исследования процесса распространения детонационной волны (ДВ) в каналах модельных распределителей с использованием современного метода высокоскоростной фотосъемки. В данной работе особое внимание уделено движению ДВ 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 со 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  $120^\circ$ .*

## Введение

В настоящее время в расчетных методиках РФЯЦ-ВНИИЭФ используется метод прямого численного моделирования работы каналов с поворотами, снаряженных ВВ [1], который позволяет описать 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, детонация распространяется по пути, отличному от кратчайшего. На полученных кадрах съемки были замечены «темные зоны», которые были идентифицированы как участки с непрореагировавшим ВВ. В данной работе образование «темной зоны» связывается с тем, что давление ДВ на участок ВВ, находящийся за поворотом, относительно невелико и поэтому детонация там возникает с некоторой задержкой. За время задержки детонации ВВ на внутренней части канала успевает разгрузиться и поэтому не реагирует – имеет место «темная зона».

Исследованию распространения детонации в каналах, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, посвящено немало работ ([2, 3] и др.). Тем не менее, до сих пор остается недостаточно исследованным процесс возникновения и размер области «темной зоны», образованной при распространении детонации в канале с поворотом, снаряженным пластичным ВВ на основе ТЭНа. Связывается этот факт со сложностью и невысоким качеством регистрации «темных зон» в каналах, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа с малым сечением (от  $1,2 \times 1$  до  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ ) с помощью растровой съемки на СФР.

Для регистрации распространения ДВ на различных углах поворота в каналах, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, был использован электронно-оптический комплекс NANOGATE 2000, основой которого является высокоскоростная камера НАНОГЕЙТ 22 с частотой съемки до 1 млрд кадров в секунду [4]. Такие характеристики позволяют визуализировать процессы распространения детонационных и ударных волн на любом этапе их зарождения и развития.

Целью настоящей работы является исследование процесса распространения ДВ на различных углах поворота в каналах, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, с использованием современного метода высокоскоростной видеосъемки. Задачей исследования является выявление факта наличия или отсутствия «темных зон» в области поворота каналов с ВВ. Актуальность настоящей работы определяется необходимостью получения данных для прямого численного моделирования работы каналов с поворотами, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, разработчиков устройств взрывной логики и других прецизионных взрывных устройств.

Для исследования выбраны углы поворота ( $60, 90, 120^\circ$ ) и сечения каналов ( $1,2 \times 1,0, 1,5 \times 1,2, 1,5 \times 1,5 \text{ мм}^2$ ).

### **Конструкция макета канала с поворотом**

В качестве объекта испытаний был использован макет с каналом, снаряженным ВВ, который изготовлен из пенопласта ПС-1-600 толщиной 20 мм. Сечения каналов были 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 поворотов каналов выбраны в трех вариантах:  $60, 90$  и  $120^\circ$ .

Канал макета был снаряжен пластичным ВВ на основе ТЭНа. Эскиз (угол поворота  $90^\circ$ ) и внешний вид макета (угол поворота  $60, 120^\circ$ ) представлены на рис. 1.

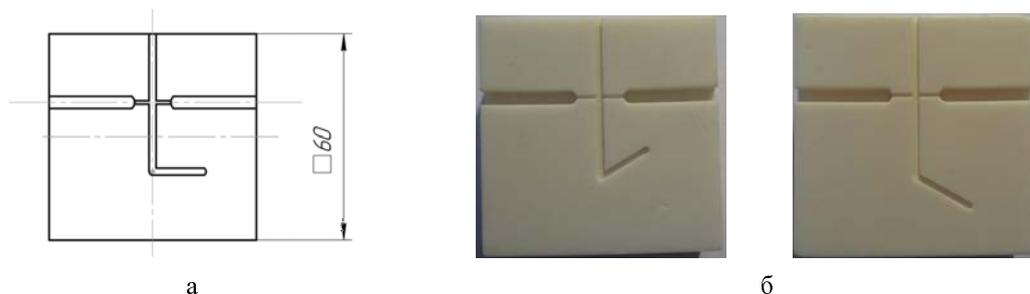


Рис. 1. Эскиз и внешний вид макета с углами поворота  $90, 60, 120^\circ$ : а – эскиз макета с углом поворота  $90^\circ$ ; б – внешний вид макета с углом поворота  $60, 120^\circ$

### ***Исследование процесса распространения детонации в каналах с различными углами поворота***

Во всех представленных в этом разделе экспериментах для регистрации процесса распространения ДВ использовали камеру НАНОГЕЙТ 22 [4]. Запуск камеры осуществлялся по срабатыванию волоконно-оптического датчика, который был установлен в пазу конструкции макета

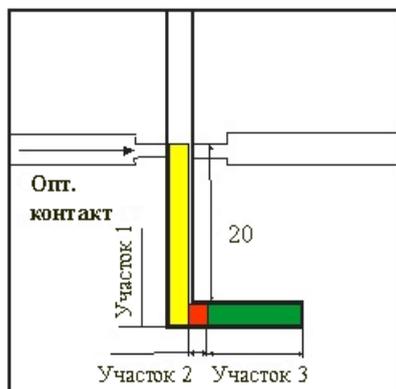


Рис. 2. Схема модельной сборки с указанием местоположения контакта для запуска камеры НАНОГЕЙТ 22

(рис. 2, см. также цветную вкладку). Момент срабатывания волоконно-оптического датчика принят за начало отсчета времени. Время экспозиции кадра во всех опытах составляло 20 нс, межкадровое расстояние 80 нс, задержка запуска камеры НАНОГЕЙТ 22 равна 2,1 мкс. Для улучшения качества регистрации процесса распространения ДВ поверхность макета (кроме канала) была закраснена чернилами.

Для удобства описания процесса распространения ДВ в канале макета весь 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.

### ***Исследование процесса распространения детонации в канале с углом поворота 90°***

При исследовании процесса распространения ДВ в канале с углом поворота 90° проведены эксперименты с сечениями каналов 1,2×1,0, 1,5×1,2, 1,5×1,5 мм<sup>2</sup> (по одному эксперименту на каждое сечение). Кадры распространения ДВ в канале с сечением 1,5×1,2 мм<sup>2</sup> представлены на рис. 3. Изображения получены в результате наложения рабочего снимка на предварительный. Для наглядности предварительный снимок переведен в негатив.

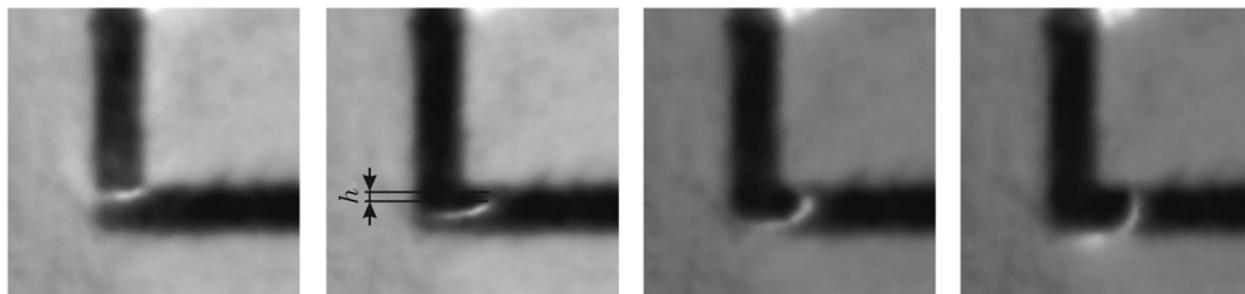


Рис. 3. Кадры распространения детонационной волны в канале с сечением 1,5×1,2 мм<sup>2</sup> и углом поворота 90°

Кадры распространения ДВ в области поворота на  $90^\circ$  в псевдоцветах\* (увеличенный масштаб) представлены на рис. 4 (см. также цветную вкладку).

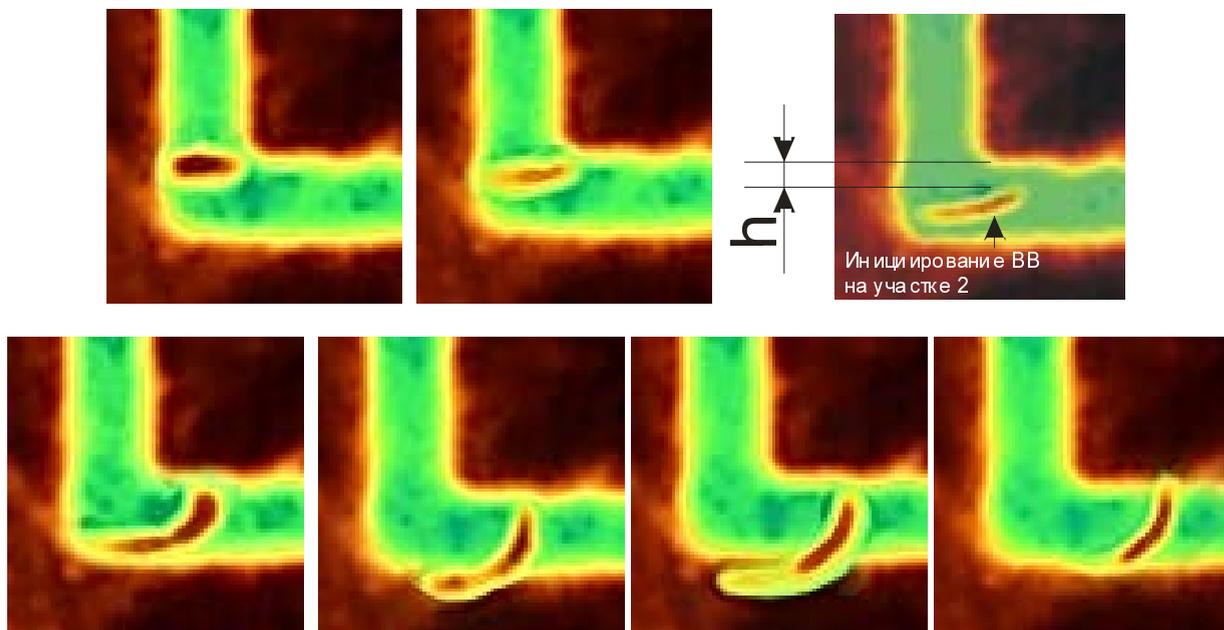


Рис. 4. Кадры распространения детонационной волны в канале с сечением  $1,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$  и углом поворота  $90^\circ$  (увеличенный масштаб)

На полученных изображениях (см. рис. 4, 5) видно, что на протяжении участка 1 до угла поворота детонационный фронт сохраняет линейный характер. При достижении угла поворота наблюдается «проскок» детонации (см. рис. 4), т. е. происходит дальнейшее движение ДВ по участку 1 без ее вхождения на участок 2. Величина «проскока» детонации ( $h$ ), вероятнее всего, определяется детонационными характеристиками пластичного ВВ на основе ТЭНа (критическими сечением и диаметром детонации) [3] и для угла  $90^\circ$  равняется нескольким долям миллиметра  $h = 0,3-0,5 \text{ мм}$  от внутреннего угла. После «проскока» детонации в области поворота на участке 2 (см. рис. 4) происходит иницирование ВВ, при этом по участку 2 начинает распространяться расходящаяся ДВ, фронт ДВ, распространяющийся по участку 1 начинает приобретать 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, начинает выравниваться и становится линейным. ДВ после поворота распространяется под некоторым углом к нормали, значение которого изменяется от  $\sim 45^\circ$  вблизи поворота до  $\sim 75^\circ$  на расстоянии  $1,5-2,5 \text{ мм}$  от угла.

\*При работе с монохромными изображениями некоторые области могут восприниматься человеческим зрением как области постоянной яркости. Фильтр псевдоцвета позволяет преобразовать монохромное изображение в цветное. Присвоение пикселям тех или иных цветов происходит в результате квантования по уровням яркости. Интенсивность свечения увеличивается от сиреневого цвета к бордовому.

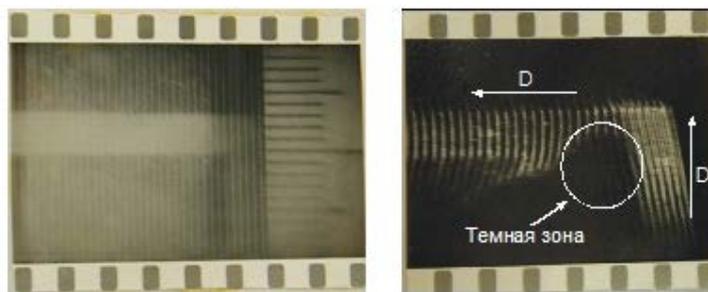


Рис. 5. Предварительный и рабочий снимок (получен с помощью растровой съемки на СФР) распространения детонации на повороте угла  $90^\circ$  в канале макета, снаряженном пластичным ВВ на основе гексогена

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. 5 и 6 представлены снимки, демонстрирующие области с «темными зонами», зарегистрированные в работах, где исследовалось распространение детонации в каналах сечением  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>, снаряженных пластичным ВВ на основе гексогена.

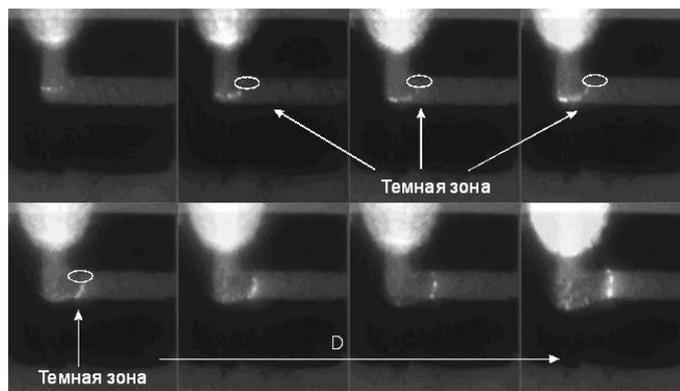


Рис. 6. Рабочий снимок (получен с помощью съемки на НАНОГЕЙТ 22) распространения детонации на повороте угла  $90^\circ$  в канале макета, снаряженном пластичным ВВ на основе гексогена

### *Исследование процесса распространения детонации в канале с углом поворота $60^\circ$*

При исследовании процесса распространения ДВ в канале с углом поворота  $60^\circ$  проведены эксперименты с сечениями каналов  $1,2 \times 1,0$ ,  $1,5 \times 1,2$ ,  $1,5 \times 1,5$  мм<sup>2</sup> (по одному эксперименту на каждое сечение). Кадры распространения ДВ в канале с сечением  $1,5 \times 1,2$  мм<sup>2</sup> представлены на рис. 7.

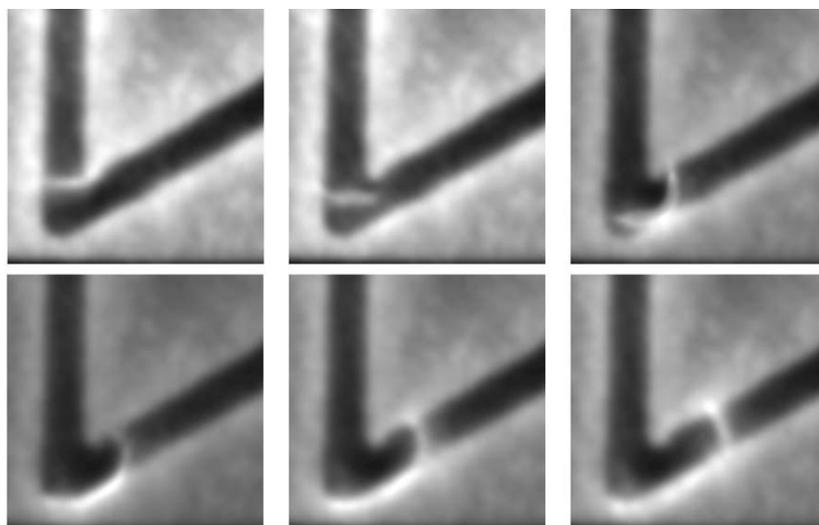


Рис. 7. Кадры распространения детонационной волны в канале  $1,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$  и углом поворота  $60^\circ$

Кадры распространения ДВ в области поворота на  $60^\circ$  в псевдоцветах (увеличенный масштаб) представлены на рис. 8 (см. также цветную вставку).

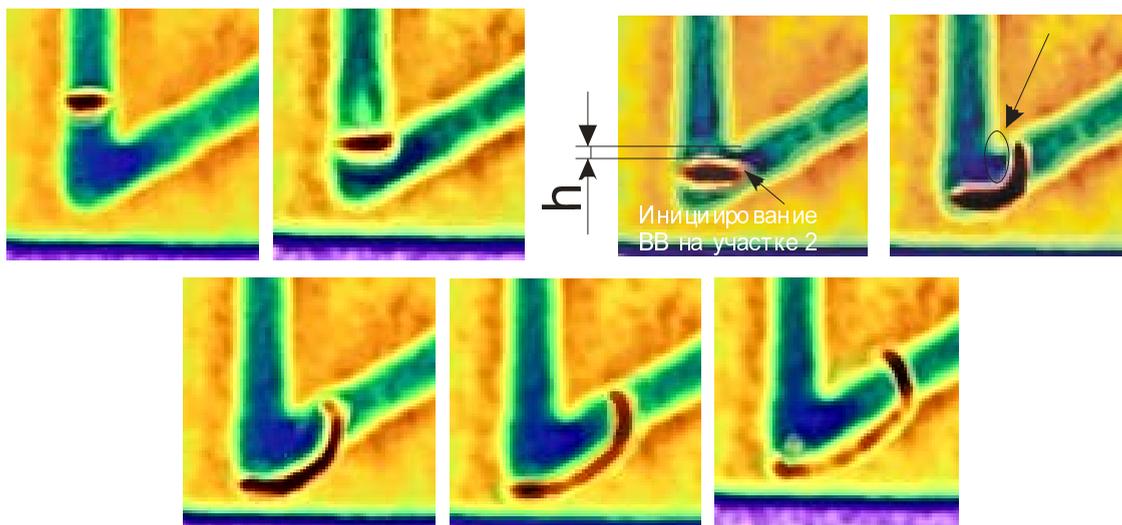


Рис. 8. Кадры распространения детонационной волны в канале с сечением  $1,5 \times 1,2 \text{ мм}^2$  и углом поворота  $60^\circ$  (увеличенный масштаб)

На полученных изображениях (см. рис. 7, 8) видно, что на протяжении участка 1 до угла поворота детонационный фронт сохраняет линейный характер. При достижении угла поворота наблюдается «проскок» детонации (см. рис. 8), величина которого равна примерно половине ширины канала  $h = 0,6-0,8 \text{ мм}$ , считая от внутреннего угла. На кадрах в области вблизи поворота угла во внутренней части канала отсутствует свечение фронта ДВ (выделенная область со стрелками на рис. 8). Исходя из этого, можно предположить, что в повороте угла возможно образование «темной зоны» размерами не более  $0,5 \times (0,3-0,4) \text{ мм}$ . Дальнейшее распространение детонации в пластичном ВВ на основе ТЭНа в каналах за поворотом угла  $60^\circ$  осуществляется аналогично

с распространением ДВ в каналах с поворотом угла  $90^\circ$  (см. подраздел «Исследование процесса распространения детонации в канале с углом поворота  $90^\circ$ »).

***Исследование процесса распространения детонации в канале с углом поворота  $120^\circ$***

При исследовании процесса распространения ДВ в канале с углом поворота  $120^\circ$  проведены эксперименты с сечениями каналов  $1,2 \times 1,0$ ,  $1,5 \times 1,2$ ,  $1,5 \times 1,5$  мм<sup>2</sup> (по одному эксперименту на каждое сечение). Кадры распространения ДВ в канале с сечением  $1,5 \times 1,2$  мм<sup>2</sup> представлены на рис. 9.

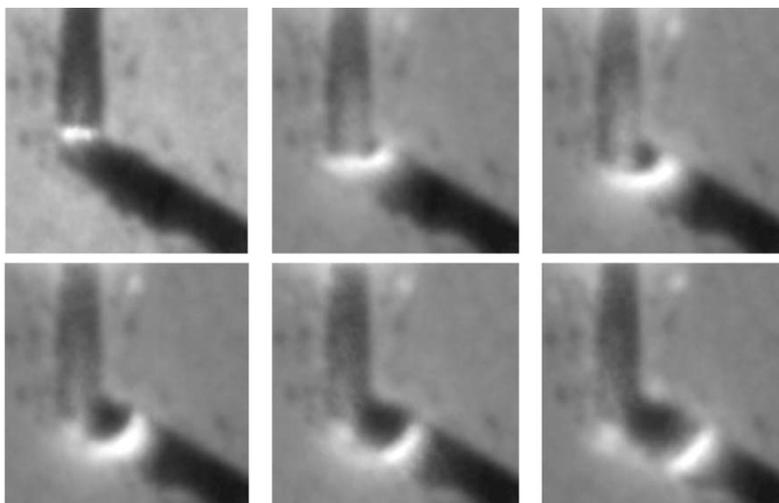


Рис. 9. Кадры распространения детонационной волны в канале с сечением  $1,5 \times 1,2$  мм<sup>2</sup> и углом поворота  $120^\circ$

Кадры распространения ДВ в области поворота на  $120^\circ$  в псевдоцветах (увеличенный масштаб) представлены на рис. 10 (см. также цветную вставку).

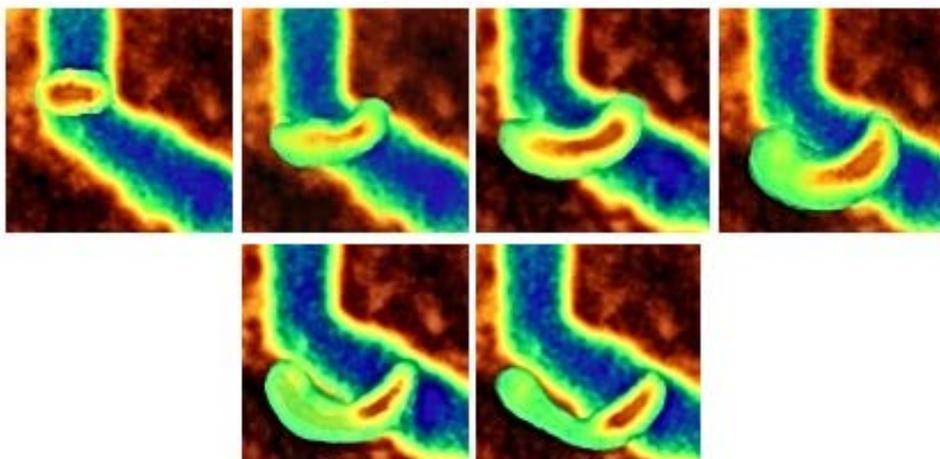


Рис. 10. Кадры распространения детонационной волны в канале с сечением  $1,5 \times 1,2$  мм<sup>2</sup> и углом поворота  $120^\circ$  (увеличенный масштаб)

Из представленных на рис. 9, 10 кадров видно, что распространение детонации в пластичном ВВ на основе ТЭНа в каналах с поворотом угла  $120^\circ$  осуществляется аналогично с распространением ДВ в каналах с поворотом угла  $90^\circ$  (см. подраздел «Исследование процесса распространения детонации в канале с углом поворота  $90^\circ$ »). «Проскок» детонации (см. рис. 10) в области поворота на  $120^\circ$  не наблюдается. Видимых (очевидных) областей с «темными зонами» в каналах с поворотом угла  $120^\circ$  не обнаружено.

## *Заключение*

Проведено исследование процесса распространения ДВ на различных углах поворота в каналах, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, на примере макета из пенопласта. Сечения каналов макета были 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 поворотов каналов выбраны в трех вариантах:  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $120^\circ$ . Для регистрации процесса распространения ДВ использовали камеру НАНОГЕЙТ 22.

Характер распространения детонации в пластичном ВВ на основе ТЭНа в каналах сечениями  $1,2 \times 1,0$ ;  $1,5 \times 1,2$ ;  $1,5 \times 1,5$  мм<sup>2</sup> и поворотами угла  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  примерно одинаковый:

- на первоначальном прямолинейном участке канала до угла поворота фронт ДВ линейный;
- при достижении угла поворота происходит «проскок» детонации, величина которого  $h = 0,6–0,8$  мм для каналов с углом поворота  $60^\circ$  и  $h = 0,3–0,5$  мм для каналов с углами поворота  $90^\circ$ , «проскок» детонации в области поворота на  $120^\circ$  не наблюдается;

– после «проскока» детонации в области поворота угла происходит иницирование ВВ, при этом начинает распространяться расходящаяся ДВ, фронт ДВ, распространяющийся по прямолинейному участку за поворотом, начинает приобретать 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 линейным. ДВ вблизи поворота распространяется под углом  $\sim 45^\circ$  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  $120^\circ$  не обнаружено. В области поворота канала с углом  $60^\circ$  происходит образование «темной зоны» размерами не более  $0,5 \times (0,3–0,4)$  мм.

Данные о процессе распространения ДВ в каналах с поворотами малого сечения, снаряженных пластичным ВВ на основе ТЭНа, получены впервые и представляют несомненный интерес как для специалистов по прямому численному моделированию, так и для разработчиков устройств взрывной логики и других прецизионных взрывных устройств.

## Список литературы

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 // Труды Международной конференции «IX Харитоновские тематические научные чтения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007.
2. Новиков С. А., Шутов В. И. О распространении детонации в полосе, имеющей углы поворота // Физика горения и взрыва. 1980. Т. 3. С. 153–154.
3. Андреевских Л. А., Фомичева Л. В., Хабаров И. П. Практический способ контроля детонационного сечения повышенной точности // Мат. XII симпозиума по горению и взрыву. Черно-головка, 2000.
4. Электронно-оптическая восьмиканальная камера НАНОГЕЙТ-22: Руководство по эксплуатации. Москва, 2012.

## **Detonation Propagation at Bend Angles in Channels of Small Cross Section**

**E. V. Khaldeev, A. V. Bessonova, D. A. Pronin, Yu. M. Sustaeva, O. V. Shevlyagin**

*Currently, the computer simulation of the behavior of products containing explosives at various stages of their life cycle has become of increasingly greater importance. Computational methods have been verified by studying the propagation of detonation wave in channels of model distributors using high-speed photography. This paper focuses on the motion of a detonation wave at the bends of the channel and the formation of dark areas. The results obtained using a NANOGATE 2000 optoelectronic system based on a NANOGATE 22 high-speed camera with a shooting frequency of up to  $10^9$  fps are presented. The position of the detonation front moving with rotation at an angle of 60, 90, and  $120^\circ$  was first visualized with an exposure time of 20 ns and an interframe interval of 80 ns.*