

Разработка программируемой 16-ти кадровой электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ-22/16 и её применение для измерения пространственно-временных характеристик быстропротекающих процессов в баллистике и физике взрывов

С.И. Герасимов^{1,А,В,С}, М.И. Крутик^{2,Д}, В.С. Роженцов^{3,А}, Д.Ю. Смирнов^{4,В}

^А Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров Нижегородской обл., Россия

^В Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Саров Нижегородской обл., Россия

^С Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^Д ООО «Научно-Производственное Предприятие НАНОСКАН» Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0009-0008-9437-1721, npp-nanoscan@yandex.ru

³ ORCID: 0009-0008- 9309-2045-438X, rozhentsov@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0001- 5302-897X, smirnovdj@yandex.ru

Аннотация

В работе представлены основные технические характеристики и результаты применения программируемой электронно-оптической камеры НАНОГЕЙТ-22/16, разработанной в ООО «НПП НАНОСКАН», г. Москва. Представлены кадры характерных экспериментов из области физики взрыва.

Электронно-оптическая камера представляет собой 8-ми канальную систему, состоящую из одного входного объектива, зеркально-линзового блока разделения изображения на восемь каналов (дополнительный объектив, зеркальная восьмигранная призма, восемь зеркал) и сами электронно-оптические каналы (К-1 , К-8). Данные, полученные в результате регистрации изображений быстропротекающего процесса, через восемь волоконно-оптических линий связи передаются на трансивер, преобразующий сигналы на восьми оптических входах в сигнал на единственном выходе USB-3, который соединен с соответствующим входом компьютера. На мониторе компьютера происходит визуализация всех 16-ти зарегистрированных изображений. Пыле- влагозащищенный корпус электронно-оптической камеры обеспечивает возможность ее применения в условиях полигона.

Ключевые слова: высокоскоростная электронно-оптическая камера, физика взрыва, ударная волна, детонационная волна, взрывчатое вещество, научная визуализация.

1.Введение

Совершенствование методов научной визуализации [1-10] во многом определяется возможностями современных средств регистрации.

Восьмиканальная 16-ти кадровая электронно-оптическая камера предназначена для высокоскоростной регистрации изображений быстропротекающих процессов в нано- и микросекундном диапазонах времени. Внешний вид камеры показан на рисунке. 1.



Рисунок 1 – 8-ми канальная 16-ти кадровая камера «НАНОГЕЙТ 22/16».

Упрощенная опτικο-электронная схема камеры представлена на рисунке 2.

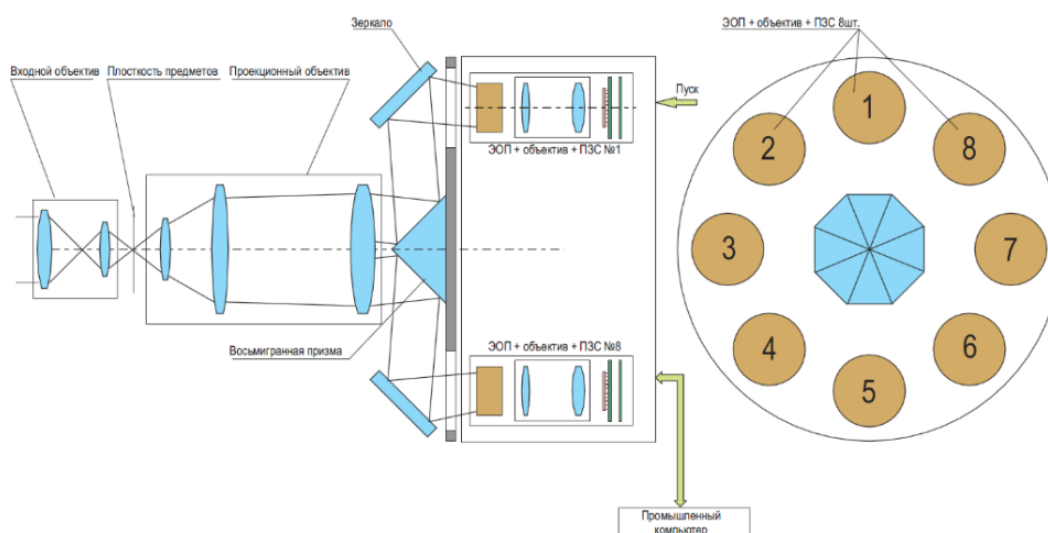


Рисунок 2 – Оптико-электронная схема камеры.

Регистрируемое изображение, проходя через входной объектив, попадает на пирамидальную зеркальную систему светораспределения на восемь электронно-оптических каналов (ЭОК). Аппаратный состав канала: затвор - планарный электронно-оптический преобразователь (ЭОП) диаметром 18 мм; перенос изображения – проекционный объектив 1:1 с апертурой 18°; сенсор - ПЗС матрица размером 15,4×15,4 мм, 2048×2048 элементов. Чувствительность каждого канала регулируется независимо регулировкой напряжения на микроканальной пластинке электронно-оптического преобразователя, что позволяет изучать процессы с большим диапазоном яркости. Каждый из восьми каналов регистрирует два кадра, параметры которых устанавливаются независимо как по времени экспозиции (5 нс ÷ 20 мкс), так и по межкадровому интервалу (5 нс ÷ 1000 мкс). Каждый канал может работать в режиме многократной экспозиции, регистрируя несколько фаз процесса на один кадр.

Последняя модификация НАНОГЕЙТ-22/16 является пыле- влагозащищенным вариантом камеры, обладает повышенной надежностью и предназначена для работы в условиях полигона. Указанное применение недоступно для зарубежных камер аналогичного класса – CORDIN Model 222 (США) и pco.dicam C8 UHS (Германия) [11,12].

Табл.1 - Основные технические характеристики камеры НАНОГЕЙТ-22/16

Параметр	Величина
Количество независимых электронно-оптических каналов	8
Количество кадров регистрируемых при однократном запуске	16
Спектральный диапазон фотокатода ЭОП	от 400 до 850 нм
Рабочий диаметры фотокатодов ЭОП	18 мм
Длительность стробирующего (затворного) импульса (устанавливается независимо для каждого канала шагом 1 нс)	от 5 нс до 20 мкс
Пространственное разрешение при всех значениях длительности строб-импульсов, не менее	44 пар лин/мм
Временной интервал между кадрами (каналами)	от 5 нс до 20 мкс
Временная задержка срабатывания затвора (устанавливается с шагом 5 нс)	от 80 нс ÷ 1 000 мкс
Абсолютная погрешность установки задержки срабатывания затвора	10^{-5}
Временная нестабильность (джиттер) запуска ЭОК, не более (в другой версии камеры возможна нестабильность менее 1 нс за счет ухудшения абсолютной погрешности значения задержки срабатывания затвора до 5×10^{-2})	5 нс
Напряжение на микроканальных пластинах ЭОП (устанавливается с шагом 1 В)	от 400 до 850 В
Разрешение	2048×2048
Разрядность АЦП	12 bit
Расширение сохраняемого файла изображения	*tiff
Количество волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) для связи с компьютером	8
Длина ВОЛС	от 5 до 300 м
Габаритные размеры (без объектива)	575×265×295мм
Потребляемая мощность	60 Вт

. Результаты

Применение камеры НАНОГЕЙТ-22/16 в экспериментах.

2.1. Институт проблем химической физики РАН (г. Черноголовка)

Все эксперименты выполнены сотрудниками ИПХФ РАН под руководством в.н.с. Дудина С.В. [13,14].

Эксперимент №1. Регистрация детонационной сходящейся волны.

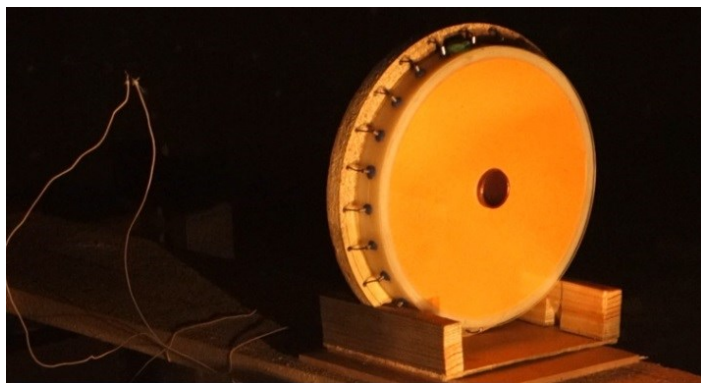


Рисунок 3 – Заряд ВВ и процесс подготовки эксперимента.

Подготовка опыта. Детонационная сходящаяся волна запускается из 24 точек, равномерно расположенных по окружности диска.

Нумерация кадров слева направо и сверху вниз. Длительность экспозиции всех кадров 20 нс. Интервалы между кадрами 1,4 мкс.

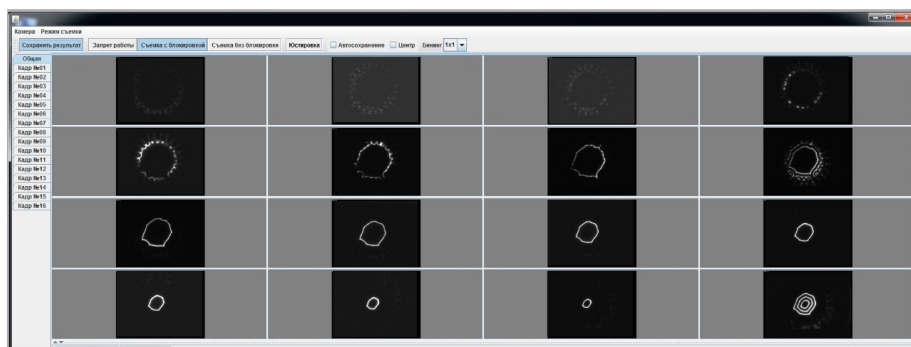


Рисунок 4 – Результаты регистрации в эксперименте.

В 8-м и 16-м кадре включен режим многократной экспозиции (наложение нескольких экспозиций ЭОП на один кадр в ПЗС матрице). В 8-м кадре экспозиции произведены в моменты 2, 4, 6 и 8 кадра. В 16-м кадре экспозиции произведены в моменты 11, 13, и 15 кадра.

Обладая набором прецизионных параметров, камера НАНОГЕЙТ-22/16 имеет возможность измерять пространственно-временные характеристики быстропротекающих процессов в наносекундной области времени с погрешностью до 1%. Ниже показаны результаты 3-х кратной экспозиции в 16-м кадре, времена которых совпадают со временами приведенных 3-х кадров.

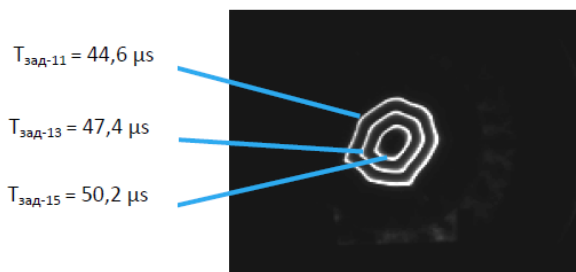


Рисунок 5 – Построение 16 кадра регистрации.

Из анализа изображений, полученных в каждом из 16-ти кадров, в том числе и в тех, в которых был включен режим многократной экспозиции, сделан вывод, что в подобном опыте, можно зарегистрировать не 16, а 64 фазы (как минимум) детонационной сходящейся волны. Для этого в каждом из 16-ти кадров включается режим 4-х кратной экспозиции с интервалом между повторными экспозициями $T_{\text{пер}} = 1/64 \times T_{\text{exp}}$, примерно через 290 нс (все время регистрации составляло $T_{\text{exp}} = 18,2$ мкс). Такое количество фаз детонационной сходящейся волны позволит зарегистрировать изменение скорости и формы детонационной сходящейся волны при её движении от периферии диска к центру.

Эксперимент № 2. Развитие детонации в насыпном взрывчатом веществе (ВВ). В ходе проведения опыта измерялся разброс скоростей детонационной волны (ДВ) в насыпном ВВ.

В ходе проведения эксперимента измерялись скорости детонации от каждого инициирующего детонационного шнура (ДШ). Полученная информация позволила оценить не только среднюю скорость ДВ, но и величину ее среднеквадратичного отклонения (СКО), что является важнейшей характеристикой любого ВВ.

Дополнительно проверялась эффективность применения режима стробирования камеры НАНОГЕЙТ 22/16 при проведении экспериментов такого типа.

В связи с тем, что во всех экспериментах скорость фронта детонационной волны на разных фазах процесса составляла от 2,5 до 9 км/с, длительность экспозиции каждого из

16-ти кадров была установлена равной 10 нс. Значения момента регистрации (Δt) указаны от времени подачи подрывного импульса.

В седьмом кадре включен режим многократной экспозиции (затвор ЭОП открывается 6 раз и интегральное изображение с экрана ЭОП накапливается в одном кадре ПЗС матрицы). Изображение шести фаз процесса, четыре из которых продублированы в других каналах для проверки точности межкадрового позиционирования камеры НАНОГЕЙТ 22/16 в целом. Множественность отображения ДВ вызвана применением бытового зеркала, формирующего паразитные отражения от поверхности стекла.

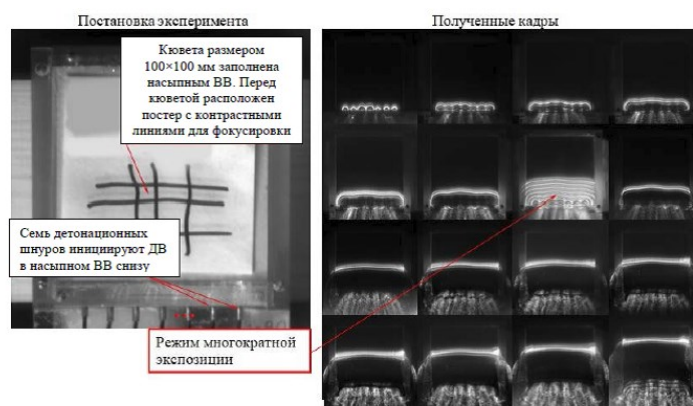


Рисунок 6 – Результаты регистрации в эксперименте №2.

Несмотря на одновременное инициирование всех ДШ равной длины, время передачи детонации в испытуемое ВВ разное. Подобная разновременность в той или иной степени свойственна любым системам многоточечного инициирования из-за технологических разбросов параметров ВВ в ДШ. Тем не менее анализ распространения ДВ в вертикальном направлении позволяет с высокой точностью измерить вертикальную скорость ДВ от каждой точки инициирования. Средняя скорость ДВ при этом составила 5 630 м/с.

Эксперимент № 3. Испытание цилиндрического имплозивного устройства. Кольцевая ДВ формируется подводными прутками ВВ. Симметрия сходящейся ДВ обеспечивается применением фокусирующей системы (ФС). Цель эксперимента - отработка ФС, уточнение параметров математической модели кинетики ВВ.

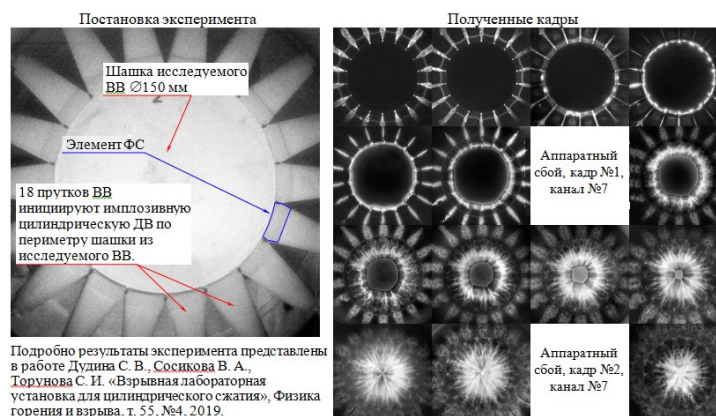


Рисунок 7 – Результаты регистрации в эксперименте №3.

Длительность экспозиции в каждом кадре 10 нс, интервал между кадрами 1 мкс. Для демонстрации качества регистрации при длительности экспозиции 10 нс на рисунке 8 отдельно показано увеличенное изображение 13-го кадра.

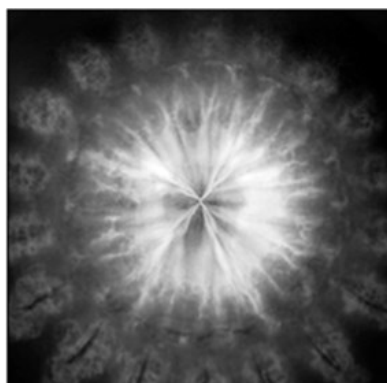


Рисунок 8 – Кадр регистрации № 13 в эксперименте №3.

2.2. РФЯЦ ВНИИЭФ, СарФТИ (г. Саров)

Эксперимент №1. Регистрация распространения детонационной волны светочувствительного взрывчатого состава ВС-2[15,16].

Полоски светочувствительного взрывчатого состава ВС-2 размером 10×80 мм, нанесённого на полированный алюминиевый лист размером 23х100х0,15 мм, с помощью липкой ленты крепились на пластине-свидетеле с габаритами 60х300х4 мм (рисунок 9).

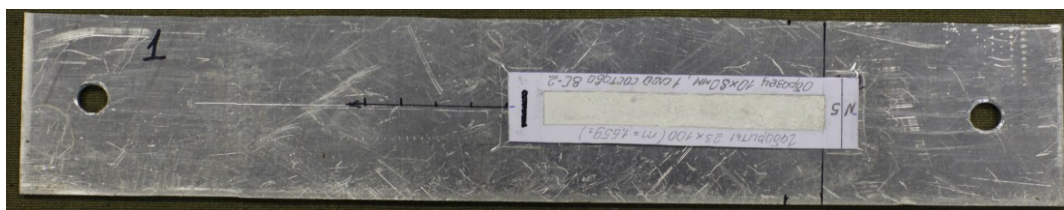


Рисунок 9 – Пластина свидетель с составом ВС-2.

Инициирование состава ВС-2 осуществлялось с помощью газоразрядного излучателя ЭВИС-3, удаленного на расстоянии 14 мм. Стример газоразрядного излучателя находился на удалении 10 мм от края полоски с составом ВС-2. Внешний вид экспериментальной установки представлен на рисунке 10.

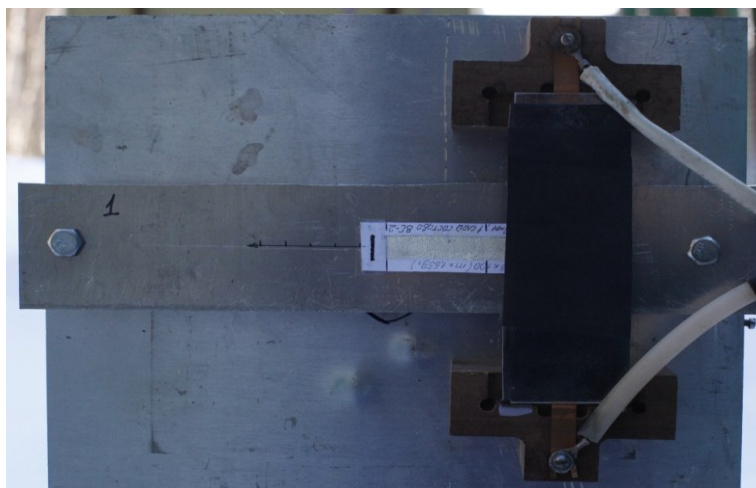


Рисунок 10 – Внешний вид экспериментальной установки

Длительность экспозиции в каждом кадре 20 нс, интервал между кадрами 1 мкс.

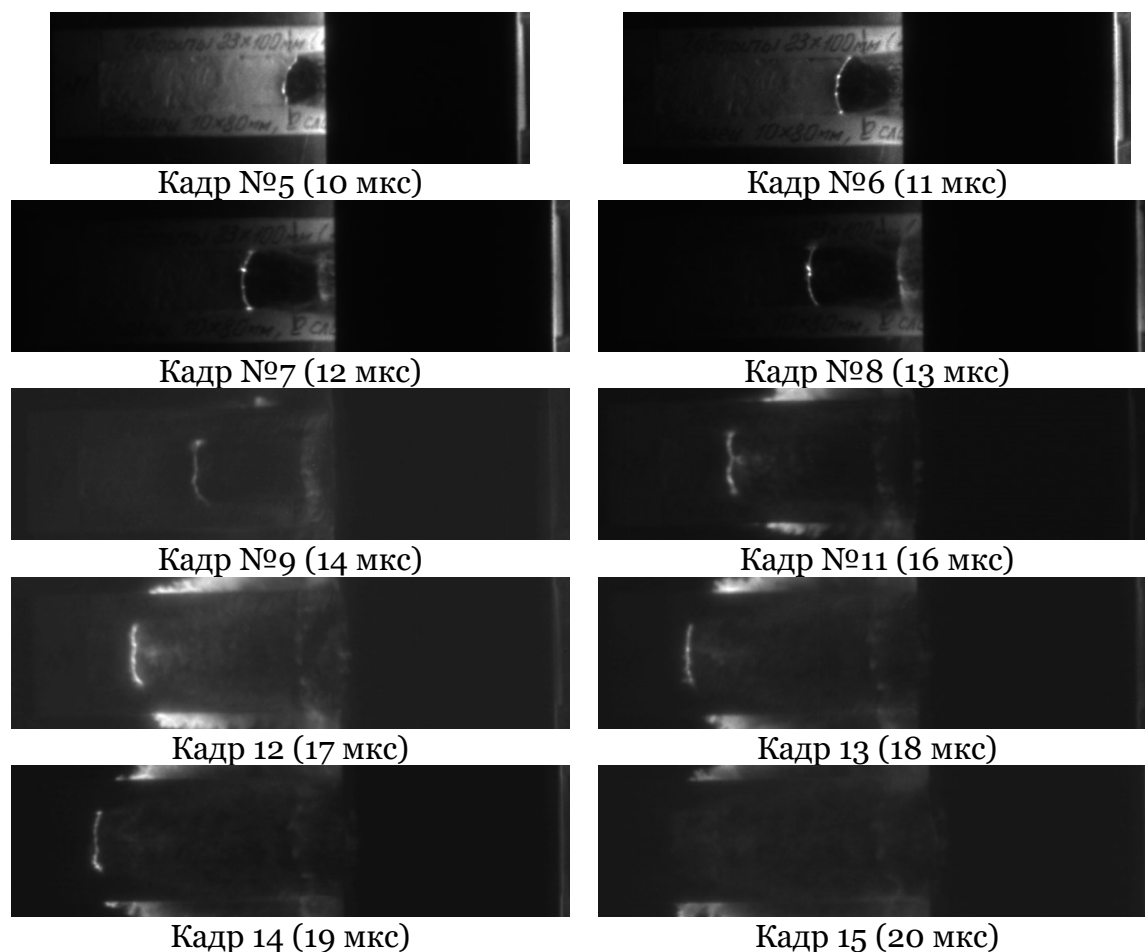


Рисунок 11 – Фрагменты кадров регистрации в эксперименте №1.

На основании полученных данных произведена оценка динамики перемещения фронта детонационной волны. Оценка проводилась по двум точкам: координаты максимально (1) и минимально (2) удаленной части фронта детонационной волны относительно правого края полоски с составом ВС-2. Среднее значение скорости перемещения фронта детонационной волны в эксперименте составило 4375 м/с.

Эксперимент №2. Взрывное метание модели имитатора преграды

В эксперименте отрабатывалась конструкция модельного взрывного метającego устройства, осуществлялся контроль целостности модели имитатора преграды. Регистрация осуществлялась на фоне рассеивающего экрана, подсвеченного взрывными источниками света. Длительность экспозиции в каждом кадре 100 нс, интервал между кадрами 5 мкс.

По полученной кинограмме движения модели имитатора преграды проводилось определение скорости движения границы силуэта, которая составила 1900 м/с.

Эксперимент №3. Оптическая регистрация высокоскоростной фотокамерой Наногейт процесса метания модели имитатора преграды (МИП) с использованием модельного взрывного метającego устройства (ВМУ) на фоне рассеивающего экрана.



Рисунок 12 – Фрагменты кадров регистрации в эксперименте №2



Рисунок 13 – Фотография рабочего поля в эксперименте №3

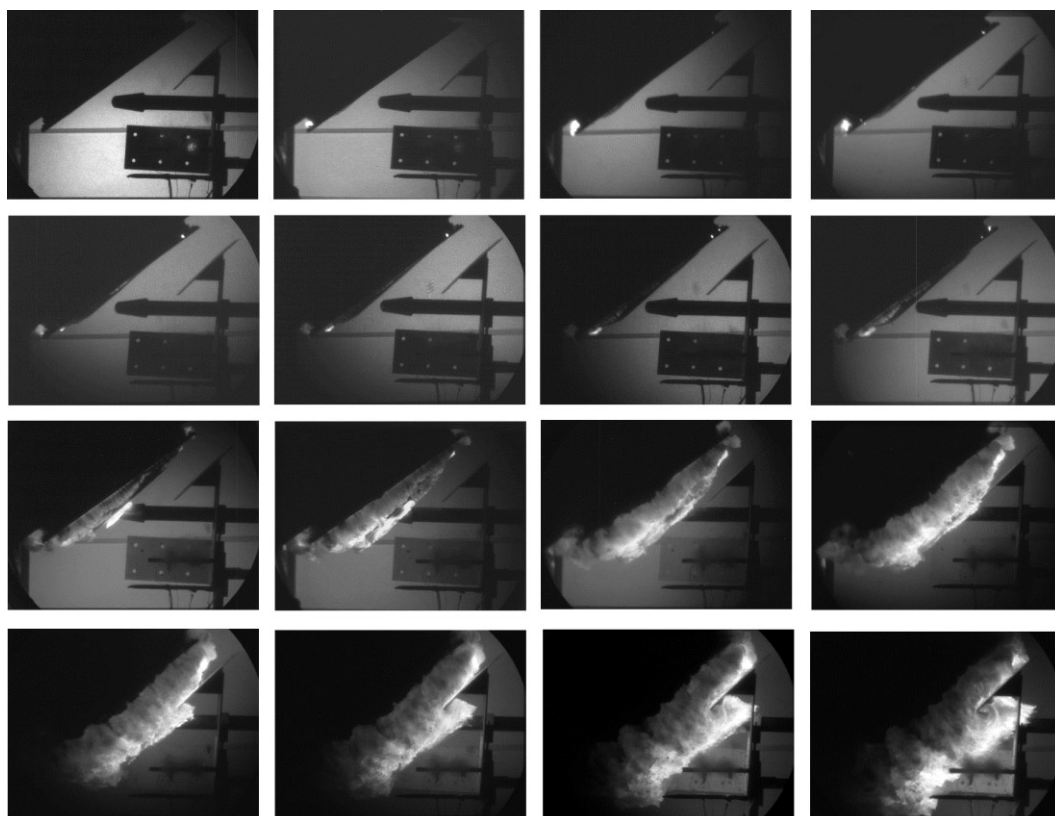


Рисунок 14 – Кадры регистрации в эксперименте №3.

Определение скорости движения границы силуэта МИП производилось по 14 кадрам при принятом межкадровом интервале $\Delta t \approx 8,75$ мкс (скорость съемки 114270 кадр/с).

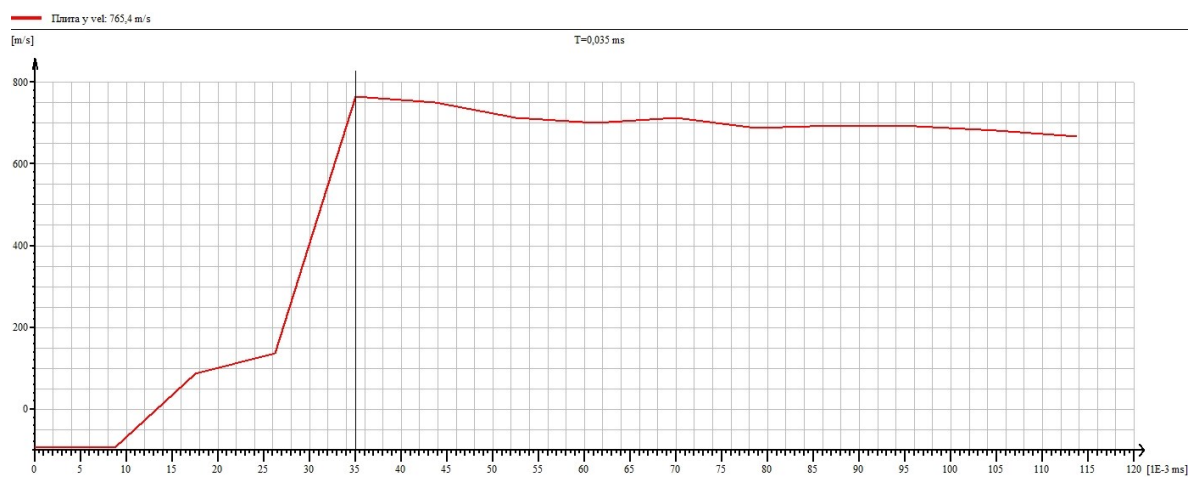


Рисунок 15 – График изменения скорости движения.

Проведены измерения значения угла поворота границы силуэта МИП. Результаты измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерений

Время, мс	Угол силуэта МИП, °
0,000	37,2
0,009	37,2
0,018	37,8
0,026	39,4
0,035	41,2

0,044	41,5
0,053	41,7
0,061	41,7
0,070	41,7
0,079	42,0
0,088	42,7
0,096	42,9
0,105	43,2
0,114	43,5

Эксперимент №4. Регистрация электронно-оптической камерой Наногейт-22/2 характера передачи детонации через стальную пластину толщиной 10 мм (300х200х10 мм) на второй заряд состава ТГ40/60 (суммарная масса 0,34 кг). Регистрация электрического сигнала с выхода «КОНТРОЛЬ» электронно-оптической камеры Наногейт-22/2 определяла времена формирования изображения.

Сборка включала два заряда размером 100х100х10 мм, разделенных стальной плитой (приклеены к ней) толщиной 10 мм, в центре одного из которых установлен электродетонатор. Внешний вид установки представлен на рисунке 16.

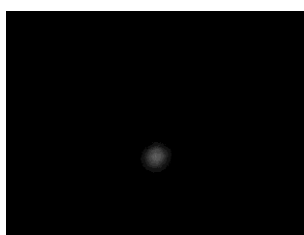


Рисунок 16 – Внешний вид установки.

Регистрация осуществлялась в дневное время при температуре окружающей среды плюс 19°C и атмосферном давлении 746 мм рт. ст.



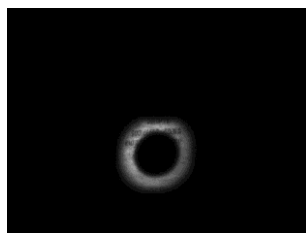
СТАТ



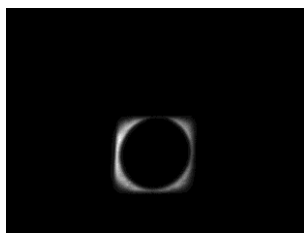
Кадр 3



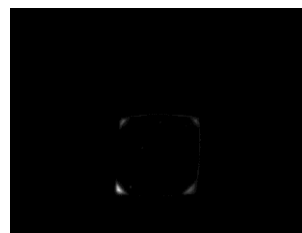
Кадр 4



Кадр 5



Кадр 6



Кадр 7

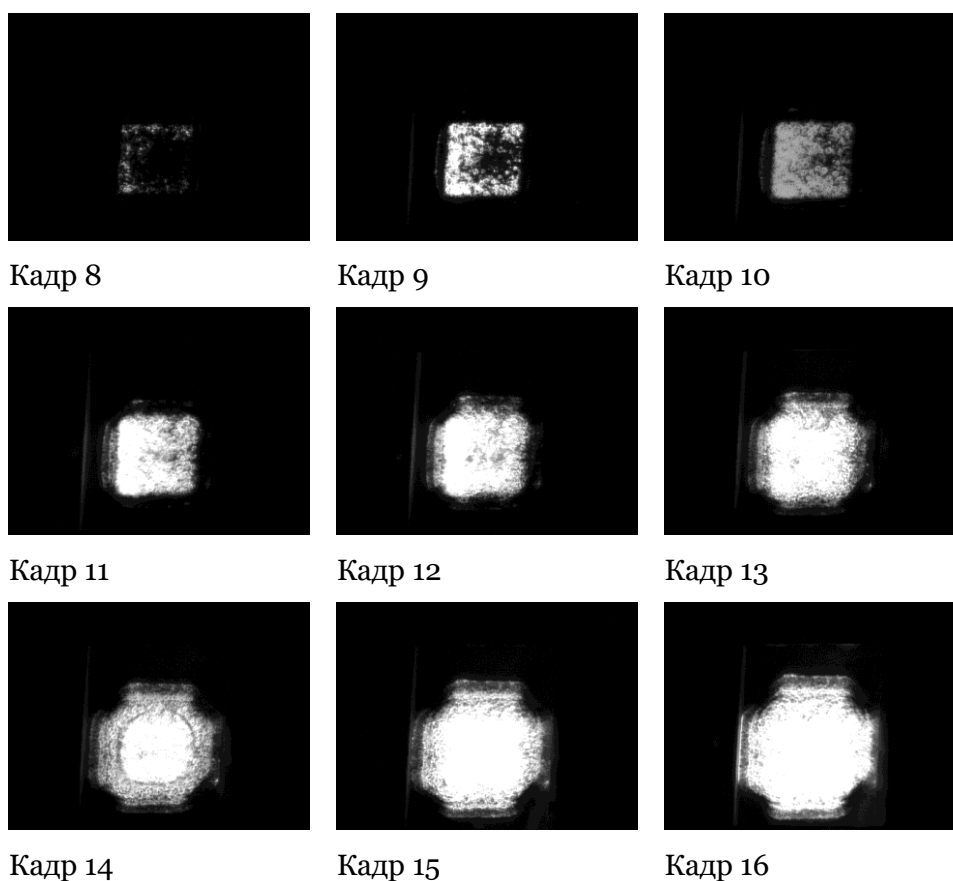


Рисунок 17 – Последовательность кадров в эксперименте №4.

Таблица 3 – Настройки Наногейт-22/2

Параметр	Значение
задержка запуска, мкс	3
экспозиция, нс	500
размер изображения, пикс	1660x1248
скорость съемки, кадр/с	500 000
фокусное расстояние, мм	300
диафрагма	2,8
напряжение на ЭОП, В	600

Цифровым осциллографом зарегистрирован сигнал с выхода «КОНТРОЛЬ» Наногейт-22/2. Курсорными измерениями определены времена построения кадров относительно синхроимпульса подрывной установки ВУ. Результаты измерений представлены в таблице 4, а осциллограмма зарегистрированных сигналов на рисунке 18.

Таблица 4 – Времена построения изображений Наногейт-22/2

№ кадра	1	2	3	4	5	6	7	8
время, мкс	3,2	5,2	7,2	9,2	11,2	13,2	15,2	17,2
№ кадра	9	10	11	12	13	14	15	16
время, мкс	19,2	21,2	23,2	25,2	27,2	29,2	31,2	33,2

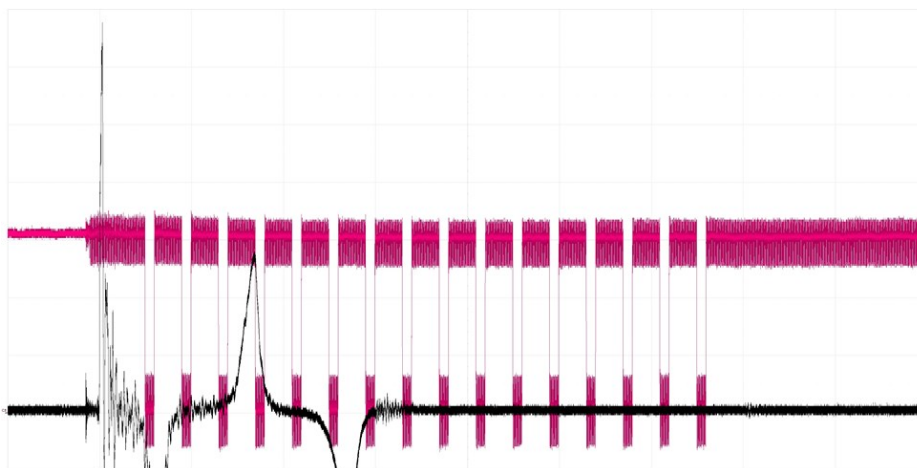


Рисунок 18 – Осциллограмма сигналов, зарегистрированных в опыте

Отдельно на рис.19 выделены кадры после расчетного выхода ударной волны на фронтальную поверхность второго (пассивного) заряда ВВ2 ($t_{\text{вых}} = 9,7$ мкс).

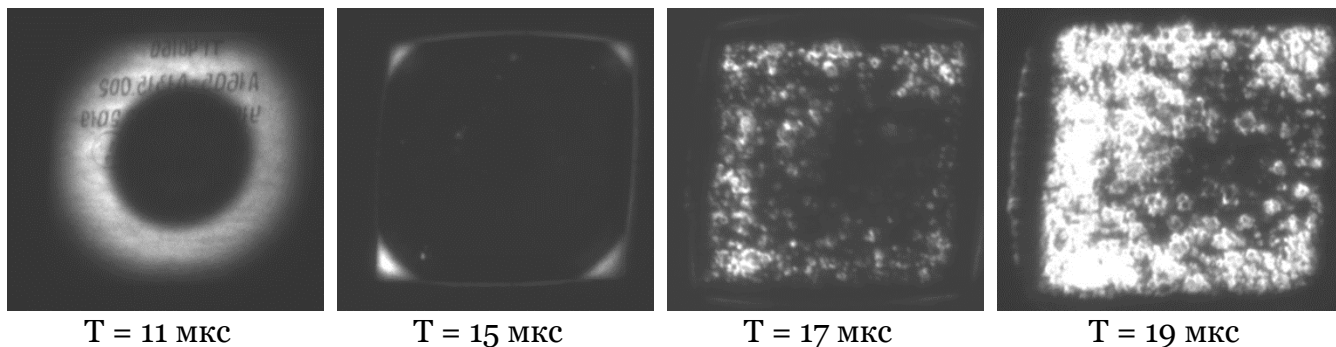


Рисунок 10 - Отдельные кадры процесса.

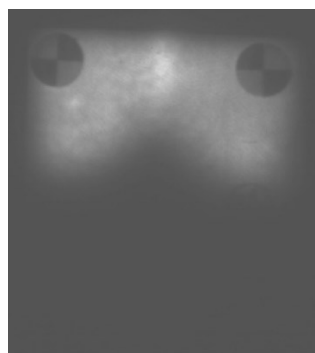
При выходе УВ на поверхность пассивного заряда идет кольцевое расширение «внутренней» подсветки (по клею), делающей видимой надпись на тыльной поверхности заряда ($t=11$ мкс.). По достижении фронта светящейся зоны периферии заряда формируется ударная волна в воздухе ($t=19$ мкс), а в заряде возникают «горячие» точки с ростом к центру заряда.

Эксперимент №5. Регистрация электронно-оптической камерой Наногейт-22/2 факта передачи детонации от заряда ТГ 40/60 размером 100х105х10 мм, к аналогичному заряду через стальную пластину толщиной 20 мм (300х200х20 мм) (заряды ВВ приклеены к ней эпоксидной смолой). В верхней части активного заряда ВВ1 установлены два электродетонатора. Внешний вид установки представлен на рисунке 20.



Рисунок 20 – Внешний вид установки (справа ВВ1, слева ВВ2).

На рисунке 21 представлены отдельные кадры процесса передачи детонации.



t=11 мкс

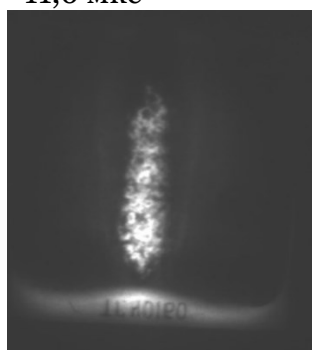


t=15 мкс

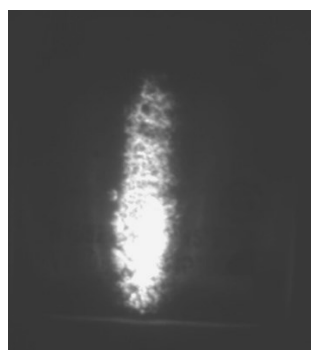


t=17 мкс

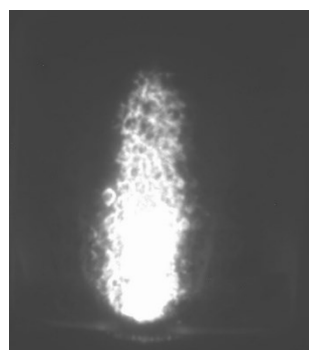
Регистрируемая
тыльная поверхность
заряда ВВ2; расчет-
ное время выхода УВ
на фронтальную по-
верхность заряда ВВ2
= 11,6 мкс



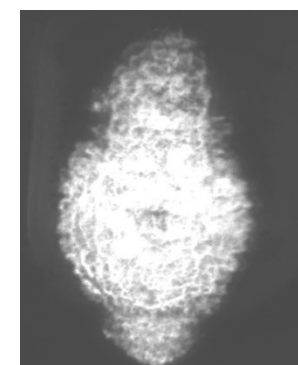
t=19 мкс



t=21 мкс



t=23 мкс



t=33 мкс

Рисунок 21 – Передача детонации

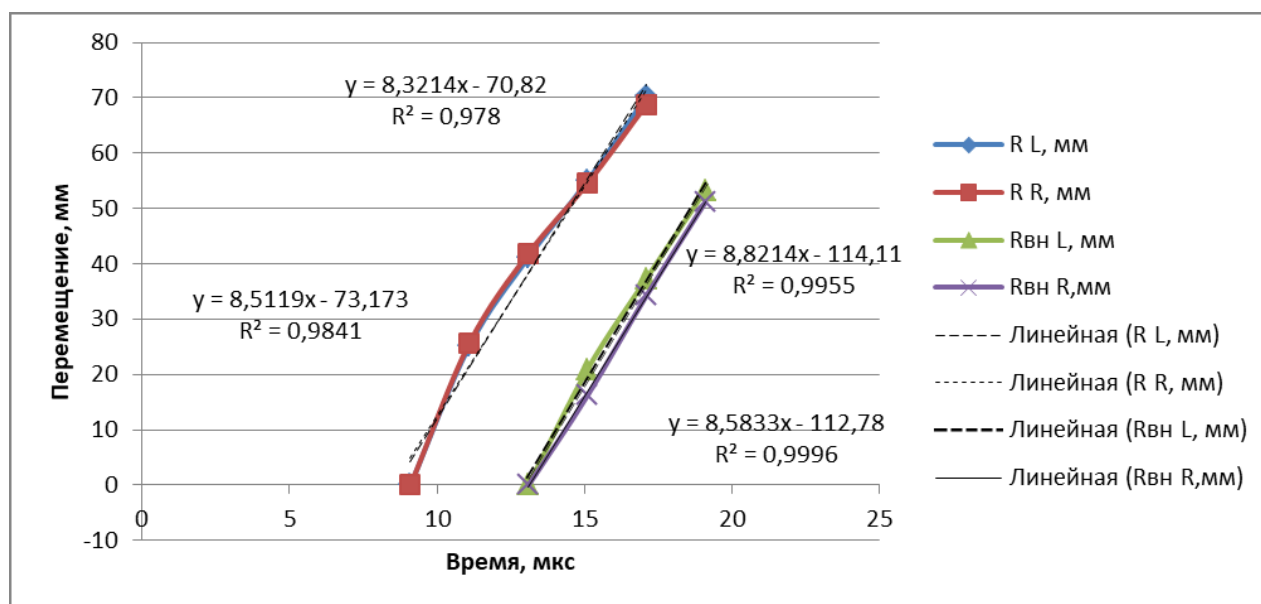


Рисунок 22 – Перемещение границ фронта ударной волны

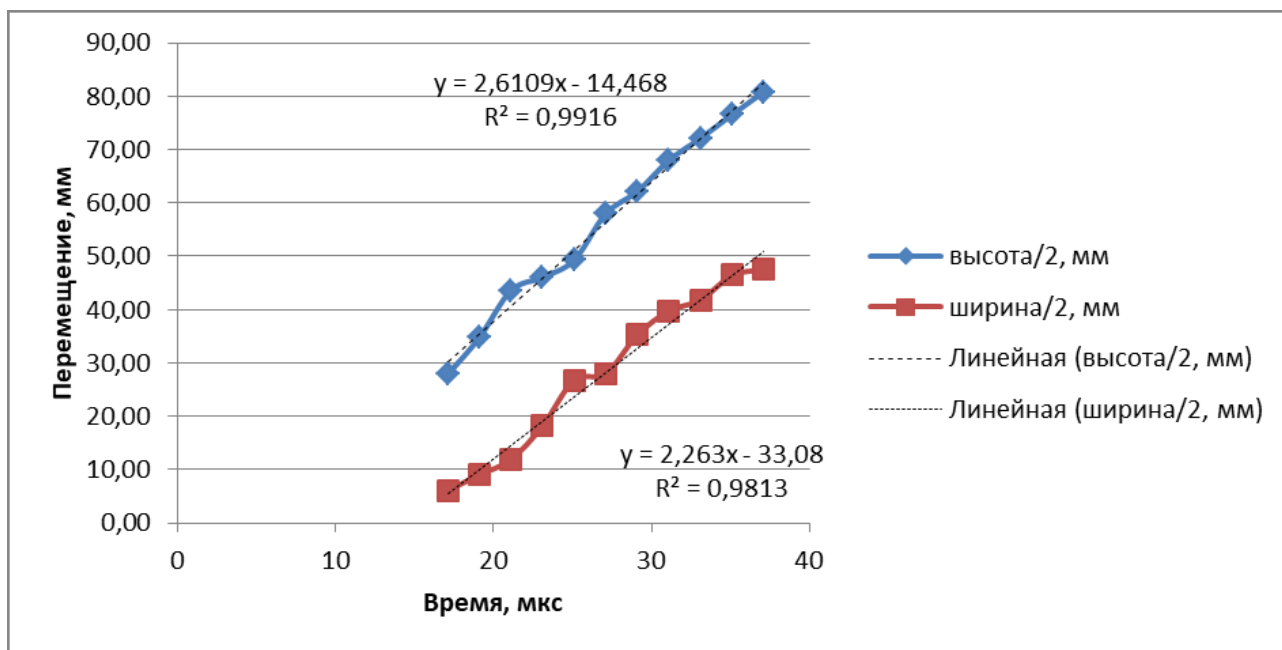


Рисунок 23 – Распространение границ светящейся зоны

Зарегистрировано распространение фронта ударной волны по клеевому слою через заряд ВВ2 с коэффициентом светопропускания 0,1 (кадр 2-7) с последующим возбуждением детонации во всем заряде (кадр 6-16).

Произведена оценка перемещения передней и задней границ фронта ударной волны, распространяющейся в клеевом слое (см. кадр 2-7 ($t=9-15$ мкс)). График перемещения от времени представлен на рисунке 22. По кадрам регистрации 6-16 произведена оценка распространения границ светящейся зоны в горизонтальном и вертикальном направлении (рисунок 23).

Таким образом было показано, что при увеличении толщины стальной пластины до двух толщин ВВ1 инициирование ВВ2 возможно при взаимодействии двух ДВ в ВВ1 (например, в плоскости между детонаторами).

Внешний вид пластины после опыта представлен на рисунках 24, 25



а)



б)

Рисунок 24 – Внешний вид стальной пластины после опыта: а) со стороны основного заряда б) со стороны пассивного (дополнительного) заряда



Рисунок 25 – Разрыв стальной пластины крупно

3. Заключение.

Разработанная отечественная камера НАНОГЕЙТ-22/16 подтвердила свои характеристики при изучении быстропротекающих процессов и будет использоваться в методиках измерений для опытов на ракетном треке (на стенде динамических нагружений).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20-19-00613).

Список литературы

1. Знаменская И.А., Гвоздева Л.Г., Знаменский Н.В. Методы визуализации в механике газа Учебное пособие. М. 2001.
2. А.Ф.Белозеров. Оптические методы визуализации газовых потоков. Казань : КГТУ, 2007.
3. Герасимов С.И., Файков Ю.И., Холин С.А. Кумулятивные источники света. Саров : РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
4. L.Foucault. Annals de l'observatory de Paris. 1958. №5. p. 203.
5. A.Toepler. Beobachtungen Nach Einer Neuen Optischen Methode. Bon, 1864.
6. GS.Settles. Important developments in schlieren and shadowgraph visualization during the last decade. Proc. 14th Intl. Symp. on Flow Vis., Daegu, Korea, ed. K. C. Kim, 2010.
7. П.Чжен. Управление отрывом потока. Москва : Издательство "Мир", 1979.
8. Бойко В.М., Оришич А.М., Павлов А.А., Пикалов А.А. Методы оптической диагностики аэрофизического эксперимента. Новосибирск : НГУ, 2009.
9. Meier, Gerd E.A. Hintergrund-Schlierenmeßverfahren für räumliche Dichtefelder. 2009. DE 19942856 B4 DE.
10. Dalziel S.B., Hughes G.O., Sutherland B.R. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren'. Experiments in Fluids. 2000. 28.
11. www.cordin.com HIGH SPEED GATED INTENSIFIED CCD CAMERA Models 222-4G, 222-4G-UV
12. www.pco.de pco.dicam C8 UHS
13. Дудин С. В., Сосиков В. А., Торунов С. И. «Взрывная лабораторная установка для цилиндрического сжатия», Физика горения и взрыва, т. 55, №4, 2019.
14. Дудин С. В., Сосиков В. А., Торунов С. И., Кулиш М. И. «Сжатие аргона на лабораторной модельной установке». XVI Всероссийский симпозиум по горению и взрыву. Суздаль, 4-9 сентября, 2022.

15. Герасимов С. И., Крутик М. И, Роженцов В. С., Сироткина А. Г., Тотышев К. В. «Регистрация быстропротекающих процессов скоростной камерой НАНОГЕЙТ-22/16», Приборы и техника эксперимента, №3, 2022.

16. Светочувствительный взрывчатый состав: пат. 2522611 Рос. Федерация. № 2012144504/05; заявл. 18.10.2012; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 20.

Development of a Programmable 16-Frame Electron-Optical Camera NANOGATE-22/16 and its Application for Measuring the Space-Time Characteristics of Fast-Flowing Processes in Ballistics and Explosion Physics

S.I. Gerasimov^{1,A,B,C}, M.I. Krutik^{2,D}, V.S. Rozhentsov^{3,A}, D.Yu. Smirnov^{4,B}

^A Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod Region, Russia

^B Sarov Institute of Physics and Technology of the National Research Nuclear University "MEPhI", Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

^C Institute of Problems of Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia

^D LLC "NANOSCAN Scientific and Production Enterprise" Moscow, Russia

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0009-0008-9437-1721, npp-nanoscan@yandex.ru

³ ORCID: 0009-0008-9309-2045-438X, rozhentsov@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0001-5302-897X, smirnovdj@yandex.ru

Abstract

The paper presents the main technical characteristics and results of the application of the programmable electron-optical camera NANOGATE-22/16, developed at NANOSCAN LLC, Moscow. The frames of characteristic experiments from the field of explosion physics are presented. The electron-optical camera is an 8-channel system consisting of one input lens, a mirror-lens unit for dividing the image into eight channels (an additional lens, an octagonal mirror prism, eight mirrors) and the electron-optical channels themselves (K-1, K-8). The data obtained as a result of recording images of a fast-flowing process is transmitted through eight fiber-optic communication lines to a transceiver that converts signals at eight optical inputs into a signal at a single USB-3 output, which is connected to the corresponding computer input. All 16 registered images are visualized on the computer monitor. The dust- and moisture-proof housing of the electron-optical camera provides the possibility of its use in landfill conditions.

Keywords: high-speed electron-optical camera, explosion physics, shock wave, detonation wave, explosive, scientific visualization.

References

1. Znamenskaya I.A., Gvozdeva L.G., Znamensky N.V. Metody vizualizatsii v mekhanike gaza [Visualization methods in gas mechanics]. Textbook. M.2001.
2. A.F.Belozerov. Opticheskiye metody vizualizatsii gazovykh potokov [Optical methods of visualization of gas flows]. Kazan : KSTU, 2007.
3. Gerasimov S.I., Faykov Yu.I., Kholin S.A. Kumulyativnyye istochniki sveta [Cumulative light sources]. Sarov : RFNC-VNIIEF, 2002.
4. L.Foucault. Annals de l'observatory de Paris. 1958. №5. p. 203.
5. A.Toepler. Beobachtungen Nach Einer Neuen Optischen Methode. Bon, 1864.
6. GS.Settles. Important developments in schlieren and shadowgraph visualization during the last decade. Proc. 14th Intl. Symp. on Flow Vis., Daegu, Korea, ed. K. C. Kim, 2010.
7. P.Zhen. Upravleniye otryvom potoka [Flow separation control]. Moscow : Mir Publishing House, 1979.

8. Boyko V.M., Orishich A.M., Pavlov A.A., Pikalov A.A. Metody opticheskoy diagnostiki a aeroficheskoy eksperimente [Methods of optical diagnostics in an aerial experiment]. Novosibirsk : NSU, 2009.
9. Meier, Gerd E.A. Hintergrund-Schlierenmeßverfahren für räumliche Dichtefelder. 2009. DE 19942856 B4 DE.
10. Dalziel S.B., Hughes G.O., Sutherland B.R. Whole-field density measurements by 'synthetic schlieren'. Experiments in Fluids. 2000. 28.
11. www.cordin.com HIGH SPEED GATED INTENSIFIED CCD CAMERA Models 222-4G, 222-4G-UV
12. www.pco.de pco.dicam C8 UHS
13. Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I. Vzryvnaya laboratornaya ustanovka dlya tsilindricheskogo szhatiya [Explosive laboratory installation for cylindrical compression], Combustion, Explosion and Shock Waves, vol. 55, No. 4, 2019.
14. Dudin S. V., Sosikov V. A., Torunov S. I., Kulish M. I. Szhatiye argona na laboratornoy modelnoy ustanovke [Compression of argon on a laboratory model installation]. XVI All-Russian Symposium on combustion and explosion. Suzdal, September 4-9, 2022.
15. Gerasimov S. I., Krutik M. I., Rozhentsov V. S., Sirotkina A. G., Totyshev K. V. Registratsiya bystroprotekayushchikh protsessov skorostnoy kameroy NANOGEYT-22/16 [Registration of fast-flowing processes with a high-speed camera NANOGEYT-22/16], Instruments and techniques of experiment, No. 3, 2022.
16. Svetochuvstvitelnyy vzryvchatyy sostav [Photosensitive explosive composition]: pat. 2522611 Ros. The Federation. No. 2012144504/05; application 18.10.2012; publ. 20.07.2014, Issue No. 20.