

Регистрация перемещения и визуализация поля деформаций цилиндрической оболочки при ее ударно-волновом нагружении

С.И. Герасимов^{1,A,B,C,D}, К.В. Тотышев^{2,A}, Н.А. Трепалов^{3,A}, Р.В. Герасимова^{4,B}

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

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

^C Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
Нижний Новгород, Россия

^D Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

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

² ORCID: 0000-0002-6232-505X, ktotyshev@bk.ru

³ ORCID: 0000-0001-5703-9027, natrepalov@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-2711-3975, r.v.gerasimova@mail.ru

Аннотация

В данной работе продемонстрирована возможность регистрации упругих деформаций и колебаний ствола легкогазовой пушки на основе высокоскоростной видеорегистрации, проведена последующая обработка полученных изображений кросскорреляционным алгоритмом. Применение высокоскоростной видеорегистрации поверхности цилиндрической оболочки и кросскорреляционный анализ полученных изображений позволили определить пространственно-временные зависимости перемещения регистрируемой поверхности и визуализировать поле деформаций. Данная возможность показана на примере высокоскоростной видеорегистрации фрагмента ствола легкогазовой пушки ЛГП-5,6 в процессе выстрела. Зарегистрированы колебания ствола в вертикальном и горизонтальном направлениях, максимальное амплитудное значение которых составило 5 мм. Визуализировано поле продольных упругих деформаций ствола, вызванных прохождением ударника по каналу ствола.

Ключевые слова: визуализация, кросскорреляционный алгоритм, деформация, упругие колебания ствола, внутренняя баллистика.

1. Введение

Развитие цифровых систем регистрации и обработки изображений существенно расширило возможности оптических методов диагностики. Появилась возможность программной обработки изображений с целью получения количественной информации об исследуемом физическом процессе. Большое распространение получили методы, основанные на корреляции цифровых изображений. Первоначально метод корреляции цифровых изображений применялся преимущественно для анализа полей скоростей в методе цифровой трассерной анемометрии (Particle Image Velocimetry - PIV) [1]. В дальнейшем данный метод обработки изображений стал использоваться для анализа изображений высокоскоростных газоплазменных и жидких потоков [2], для визуализации структуры потока в капле воды [3], для

визуализации возмущений песчаной среды [4, 5], а так же для визуализации перемещений и деформаций [6, 7].

Одной из задач баллистики является определение упругих деформаций и колебаний ствола в процессе выстрела. Интенсивный рост давления и ускоренное движение снаряда по каналу ствола при выстреле вызывает колебания ствола в различных направлениях [8]. Исследование динамики ствола в процессе выстрела является актуальной научной и практической проблемой, т. к. деформации определяют начальные условия движения снаряда на внешнебаллистической траектории, например, угол вылета снаряда из канала ствола, и, в конечном счете, влияют на точность стрельбы. Одной из первых работ, посвященных данной теме, является монография [9], в которой учитывается множество факторов, влияющих на взаимодействие снаряда со стволом. Наиболее полная постановка задачи о колебании стволов артиллерийских систем при выстреле, в рамках одномерной модели упругой динамики, представлена в работе [10].

В данной работе продемонстрирована возможность регистрации упругих деформаций и колебаний ствола легкогазовой пушки (ЛГП) на основе высокоскоростной видеорегистрации и последующей обработке полученных изображений кросскорреляционным алгоритмом.

2. Постановка эксперимента

В эксперименте осуществлялась высокоскоростная видеорегистрация участка ствола ЛГП-5,6 калибра 5,6 мм при выстреле. ЛГП-5,6 предназначена для метания имитаторов мелких частиц «космического мусора» массой до 0,1 г в диапазоне скоростей от 2,5 до 8 км/с [11, 12]. В данном эксперименте осуществлялось метание сферического ударника, выполненного из алюминиевого сплава массой 0,02 г со скоростью ~ 6,5 км/с. Внешний вид ЛГП-5,6 и ее схема приведены на рисунке 1.

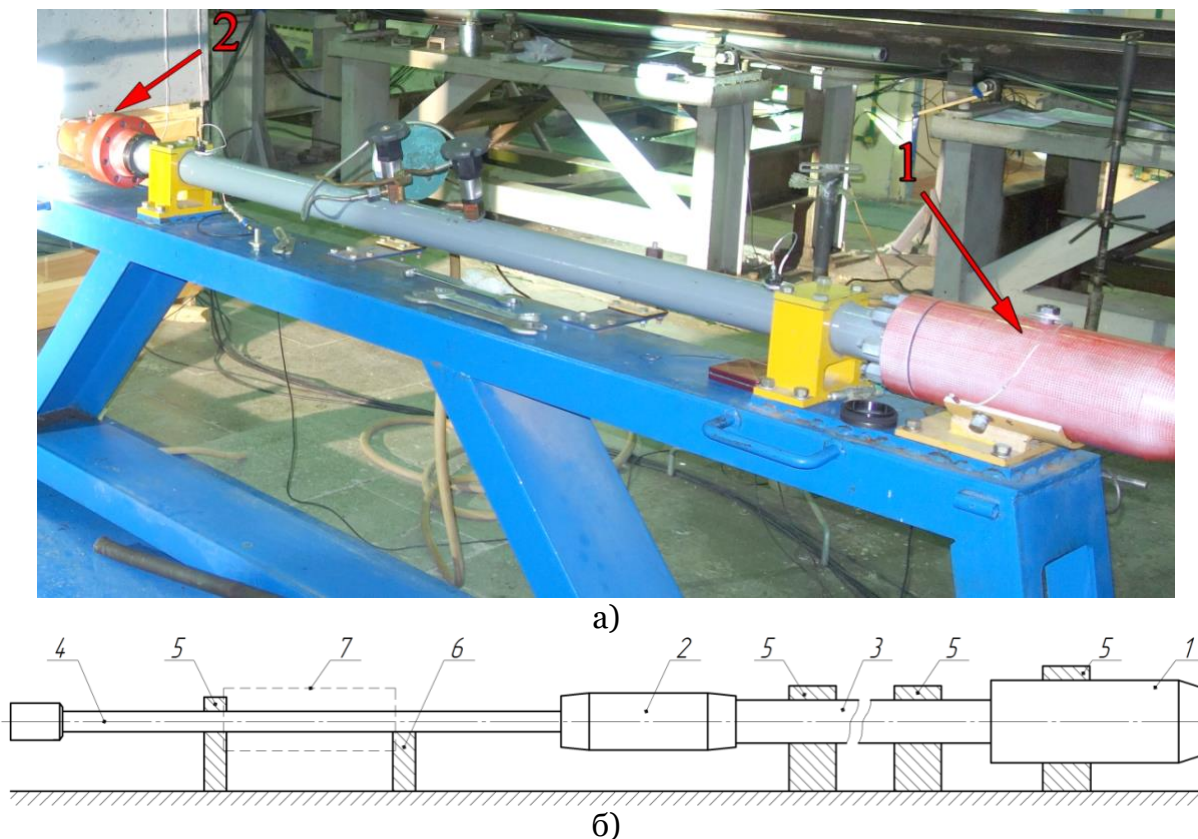


Рисунок 1 – Внешний вид ЛГП-5,6 (а) и ее схема (б): 1 – зарядная камера, 2 – форкамера, 3 – ствол поршневой, 4 – ствол баллистический, 5 – опора, 6 – ложемент, 7 – область видеорегистрации

Схема видеорегистрации обеспечивала получение изображений ствола баллистического (СБ) на участке от опоры до ложемета в дискретные моменты времени относительно запуска ЛПП-5,6 (внешний диаметр СБ 36 мм). Видеорегистрация осуществлялась в условиях внешней подсветки с частотой съемки 69 кГц, временем экспонирования кадра 1 мкс и при размере кадра 1280×256 пикс. В качестве источника света использовался газоразрядный прожектор с электрической мощностью 700 Вт и цветовой температурой 5500 К. Пространственное разрешение схемы видеорегистрации составило 3,84032 пикс/мм.

С целью определения перемещения и визуализации поля деформаций регистрируемой части СБ во время выстрела, на его поверхность был нанесен контрастный рисунок, представляющий собой горизонтальные и вертикальные линии толщиной ~ 0,3 мм с шагом ~ 4 мм (рисунок 2).

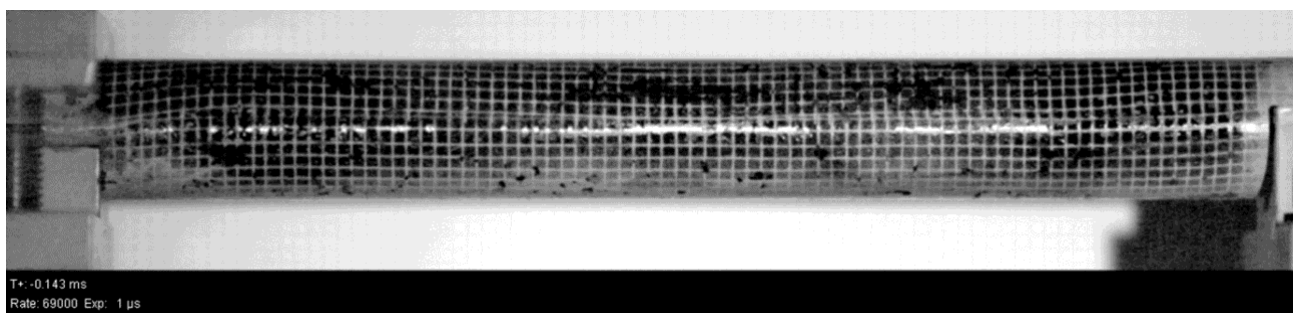


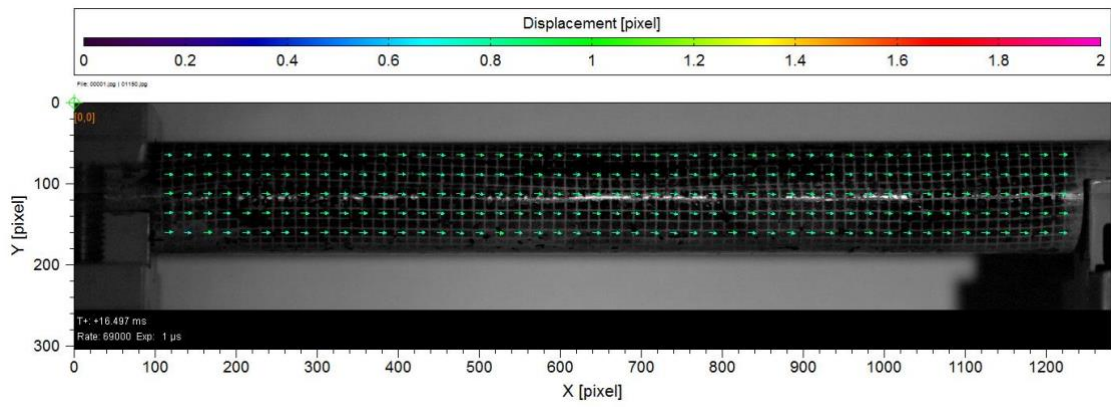
Рисунок 2 – Статическое изображение регистрируемой части СБ

Запуск высокоскоростной видеокамеры производился от сигнала на задействование ЛПП-5,6. Общее время регистрации составило 300 мс. В момент времени 17,641 мс относительно запускающего сигнала в области регистрации наблюдается импульсное изменение освещенности, что характерно для дульного выхлопа [13].

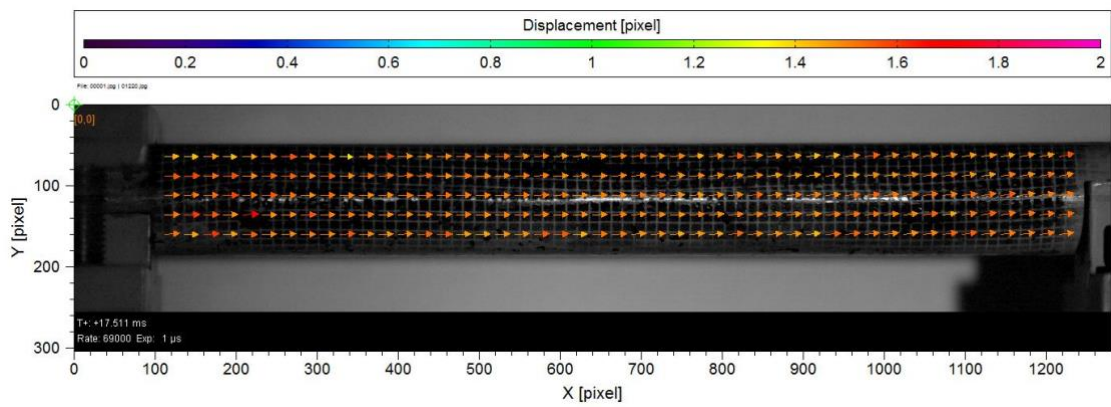
3. Анализ полученных результатов

Зарегистрированная видеoinформация была проанализирована с использованием кросскорреляционного алгоритма. На первом этапе анализировались кадры, полученные после запускающего сигнала, относительно опорного (статического) изображения СБ. Обработка проводилась в программе «PIVview2CDemo» [14]. Использовался многопроходный кросскорреляционный алгоритм обработки с квадратным окном опроса и 50 % перекрытием. Размер окна опроса итерационно уменьшался с 256 до 16 пикс. Область интереса (ROI) ограничивалась координатами (100, 50) и (1240, 180) пикс. Аппроксимация корреляционной функции проводилась с помощью трехточечной гауссовой интерполяции с субпиксельной интерполяцией. Для расчета корреляционной функции использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье.

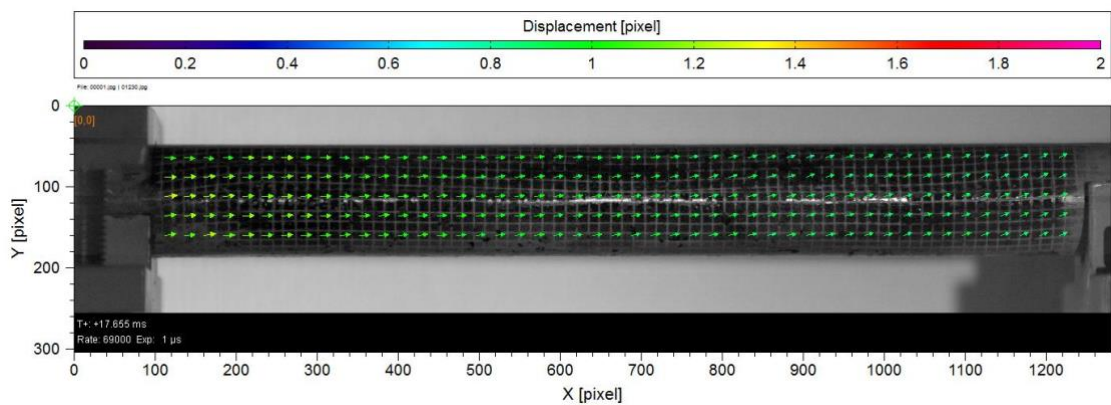
Проанализирован весь массив полученных изображений. Фрагменты результатов обработки, в виде векторного поля смещений поверхности СБ относительно статического состояния, представлены на рисунке 3.



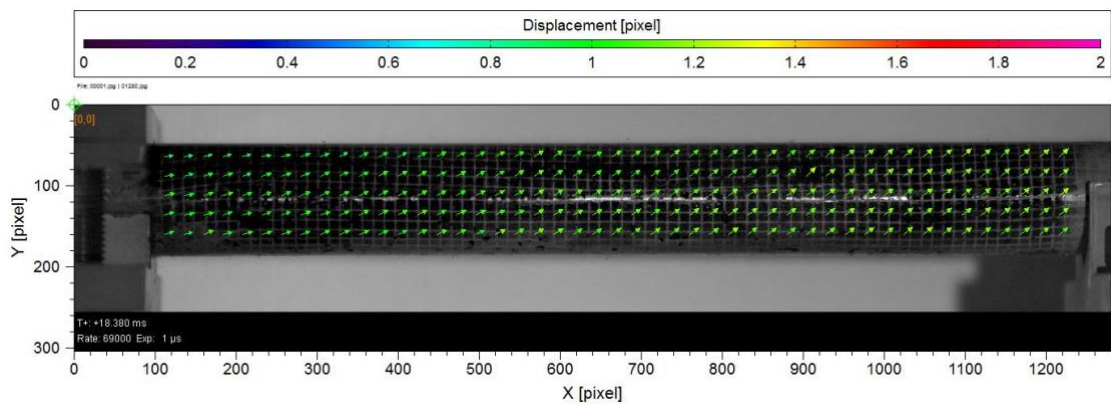
$t=16,497 \mu\text{s}$



$t=17,511 \mu\text{s}$



$t=17,655 \mu\text{s}$



$t=18,380 \mu\text{s}$

Рисунок 3 – Фрагменты кросскорреляционной обработки

Для определения пространственно-временных зависимостей колебаний элементов регистрируемой поверхности выбраны три маркерные точки А, В, С (рисунок 4). На основании результатов кросскорреляционной обработки произведена оценка динамики локального перемещения поверхности СБ в выбранных точках. Полученные временные зависимости перемещения поверхности СБ в системе координат, связанной с выбранной маркерной точкой, приведены на рисунке 5.

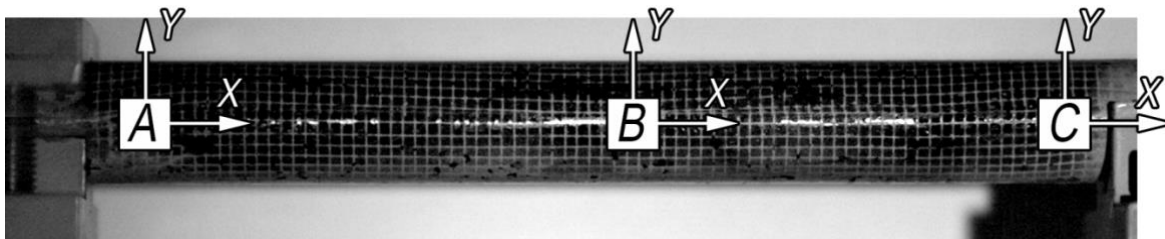


Рисунок 4 – Схема расположения маркерных точек



Рисунок 5 – Динамика локального перемещения поверхности ствола баллистического

Наибольшее амплитудное значение перемещения зарегистрировано на начальном этапе и составило 5 мм в горизонтальном и 0,5 мм в вертикальном направлениях. Увеличенный фрагмент полученных зависимостей, в сравнении с зарегистрированными значениями давления в зарядной камере, приведен на рисунке 6.

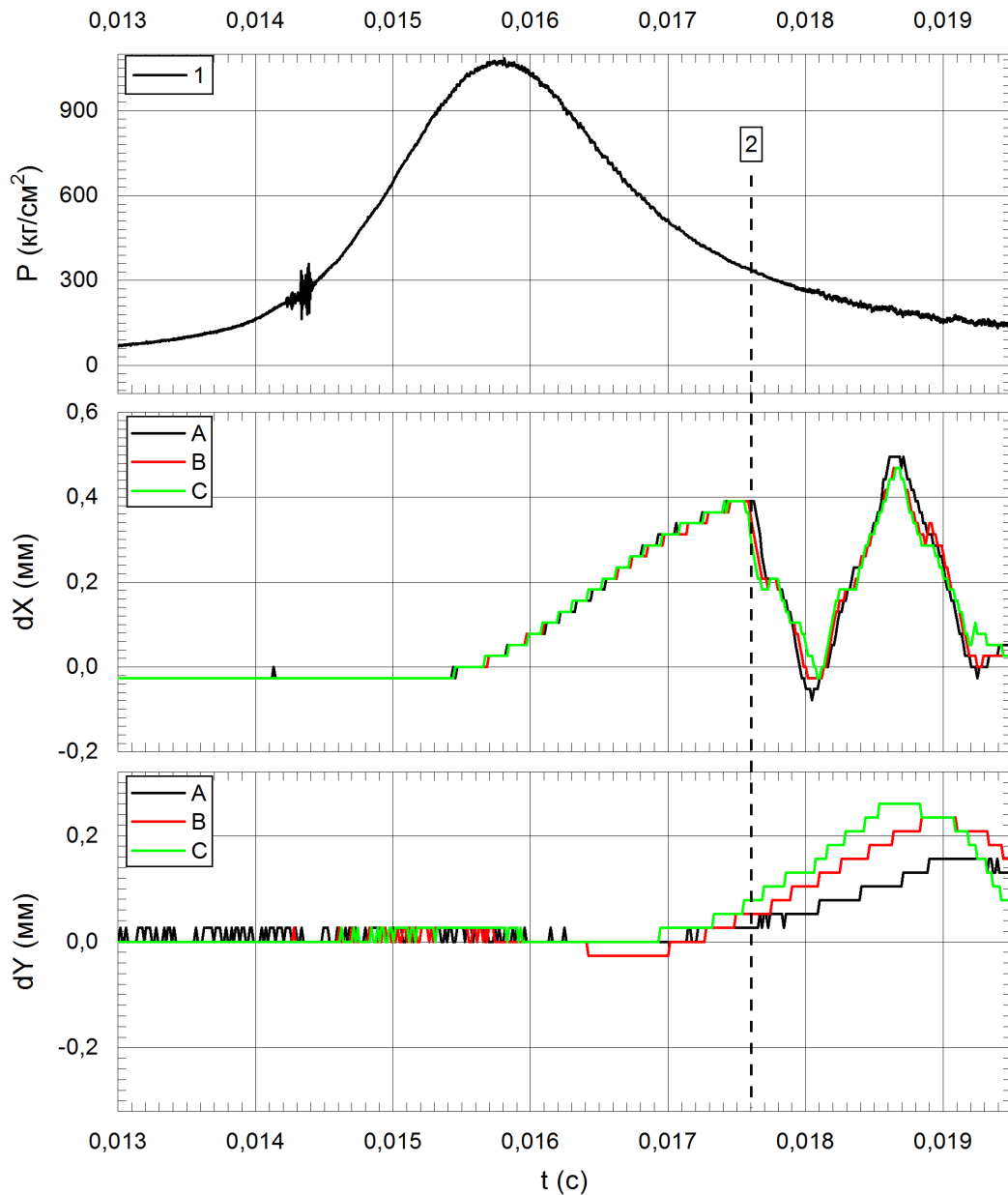
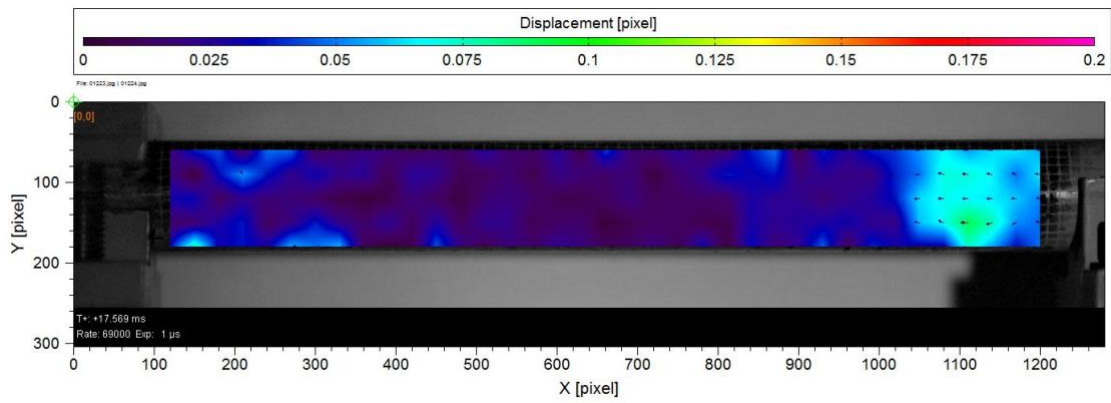
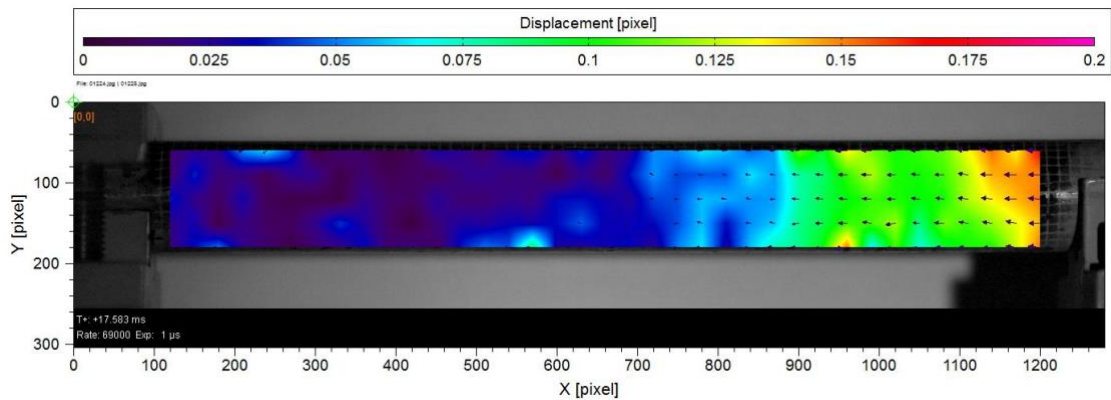


Рисунок 6 – Начальный этап динамики локального перемещения (А, В, С), давление в зарядной камере (1) и момент появления дульного выхлопа (2)

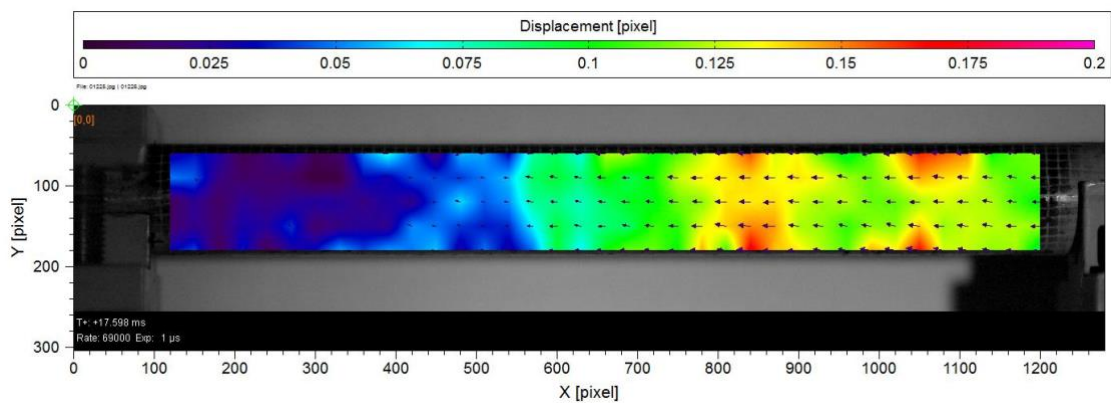
При нарастании давления в зарядной камере СБ начинает перемещаться в направлении противоположном движению ударника. С формированием дульного выхлопа происходит смена направления перемещения СБ в горизонтальной плоскости. В вертикальном направлении зарегистрировано последовательное увеличение амплитуды перемещений в точках С-В-А. На фоне перемещений СБ поле деформации, имеющее меньшие абсолютные значения перемещений, визуализировать представленным подходом не удалось. В связи с этим, массив изображений был повторно обработан кросскорреляционным алгоритмом (второй этап обработки) путем анализа последовательных пар изображений СБ. Фрагмент результатов обработки представлен на рисунке 7.



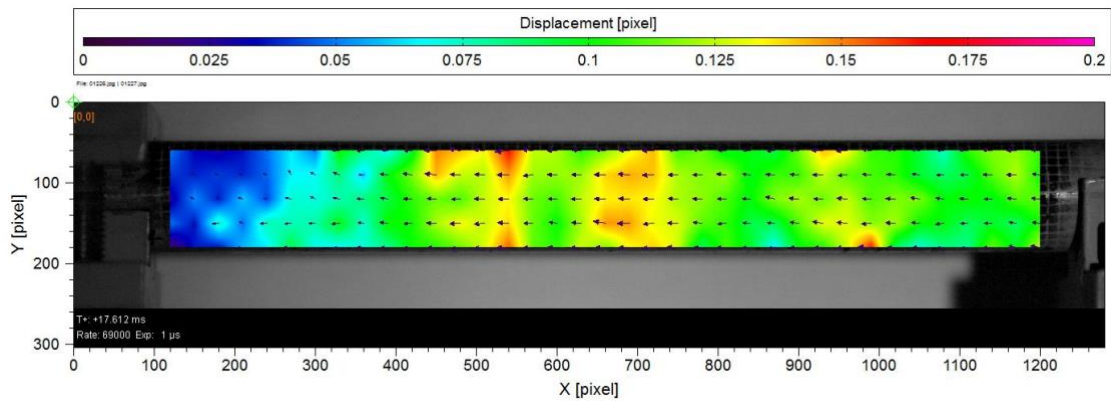
$t=(17,569 - 17,554) \mu\text{s}$



$t=(17,583 - 17,569) \mu\text{s}$



$t=(17,598 - 17,583) \mu\text{s}$



$t=(17,612 - 17,598) \mu\text{s}$

Рисунок 7 – Фрагменты кросскорреляционной обработки между последовательными кадрами

Визуализировано поле деформаций СБ, граница которого смещается в направлении движения ударника. Диаграмма перемещения границы поля деформации вдоль СБ относительно его дульного среза представлена на рисунке 8. В эксперименте с помощью рентгеновского аппарата зарегистрировано положение ударника после выхода из ствола на расстоянии 488 мм и в момент времени 17,72 мс относительно запуска ЛГП-5,6 (рисунок 9).

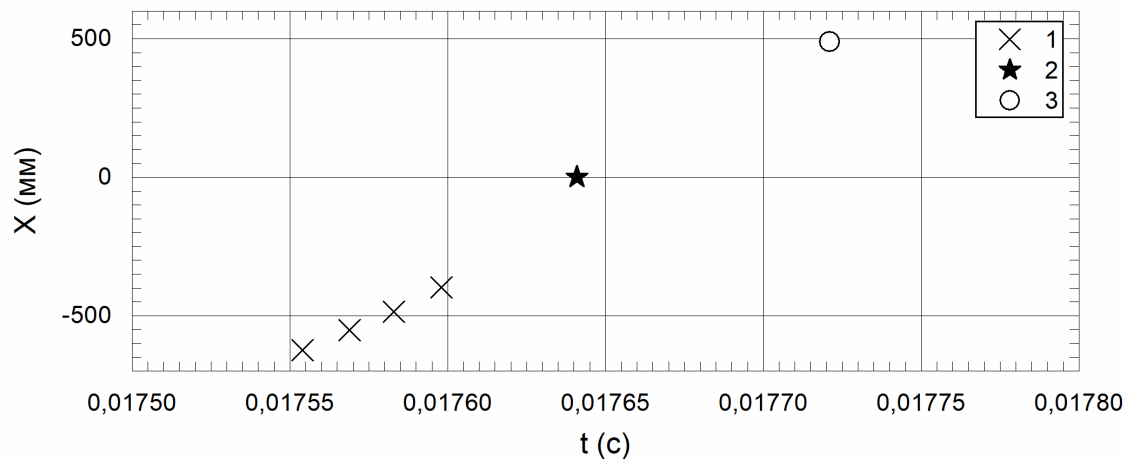


Рисунок 8 – Диаграмма перемещения границы поля деформаций (1) в сравнении с информацией о дульном выхлопе (2) и положении ударника в полете (3)

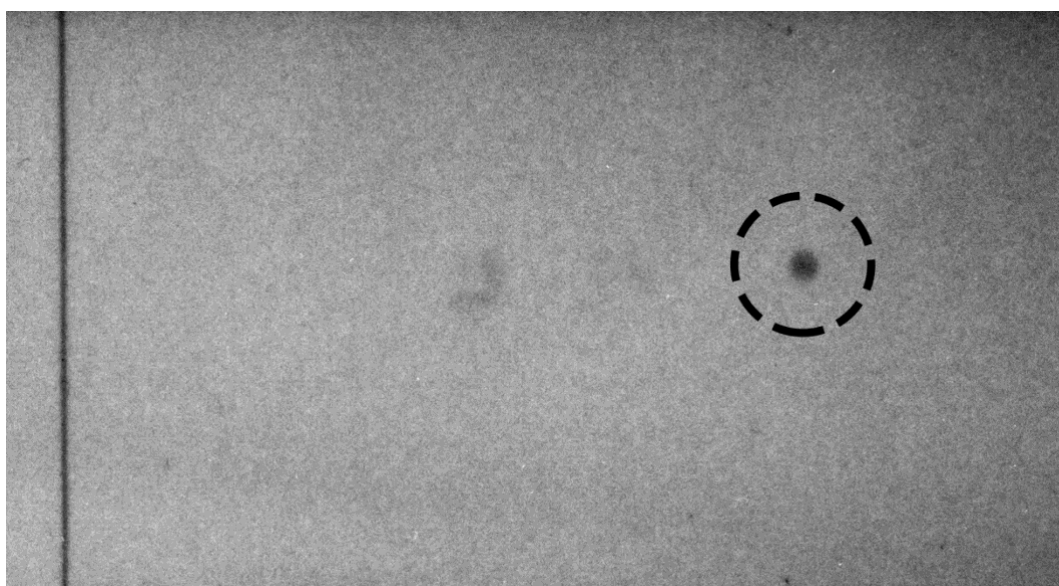


Рисунок 9 – Рентгенограмма ударника в полете

Анализ полученных данных совместно с информацией о времени формирования дульного выхлопа позволяет сделать вывод, что зарегистрированное поле деформации соответствует прохождению ударника по каналу СБ.

4. Заключение

Применение высокоскоростной видеорегистрации поверхности цилиндрической оболочки и последующий кросскорреляционный анализ полученных изображений позволяют определить пространственно временные зависимости перемещения регистрируемой поверхности, и визуализировать поле деформаций. Данная возможность продемонстрирована на примере высокоскоростной видеорегистрации фрагмента ствола легкогазовой пушки ЛГП-5,6 в процессе выстрела.

Зарегистрированы колебания ствола в вертикальном и горизонтальном направлениях, максимальное амплитудное значение которых составило 5 мм. Визуализировано поле продольных упругих деформаций ствола вызванных прохождением ударника по каналу ствола. Пространственное разрешение схемы регистрации составило 3,84032 пикс/мм, что обеспечило регистрацию (визуализацию) смещений от 0,03 мм. Работа выполнена при поддержке РФ (грант 20-19-00613).

Список использованных источников

1. Adrian, R.J. Twenty years of particle image velocimetry. // *Experiments in Fluids*. 2005. Vol. 39. No. 2. P. 159-169.
2. Знаменская, И.А. Методы цифрового анализа изображений жидких и газоплазменных потоков на основе кросс-корреляционной обработки / И.А. Знаменская, Е.Ю. Коротева, Ф.Н. Глазырин // *Научная визуализация*. – 2018. – Т. 10. – № 4. – С. 111-119. – DOI 10.26583/sv.10.4.08.
3. Ягодницына, А.А. Визуализация течения в испаряющейся капле на подложке с помощью метода *micro-PIV* / А.А. Ягодницына, А.В. Бильский, О.А. Кабов // *Научная визуализация*. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 53-58.
4. Экспериментальное исследование движения ударника в песчаной среде бесконтактным способом / С.И. Герасимов, А.В. Зубанков, В.И. Ерофеев [и др.] // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2021. – Т. 62. – № 1(365). – С. 159-164. – DOI 10.15372/PMTF20210117.
5. Моделирование и визуализация взрыва в песчаном грунте. Расчет и эксперимент / В.А. Кузьмин, В.А. Кикеев, С.И. Герасимов [и др.] // *Научная визуализация*. – 2020. – Т. 12. – № 3. – С. 79-88. – DOI 10.26583/sv.12.3.07.
6. Осинцев, А.В. Визуализация перемещений и деформаций методом цифровой корреляции изображений / А.В. Осинцев, К.Ю. Очков // *Научная визуализация*. – 2016. – Т. 8. – № 2. – С. 15-23.
7. Минеев, С.А. Анализ спекл-изображений деформируемой поверхности на основе алгоритмов обработки оптического потока / С.А. Минеев, А.Ю. Угольников, Л.Б. Лозовская // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2014. – № 2-1. – С. 81-86.
8. Орлов Б.В., Ларман Э.К., Маликов В.Г. Устройство и проектирование стволов артиллерийских орудий: монография. М.: Машиностроение, 1976. 432 с.
9. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. М.: Оборонгиз, 1962. 705 с.
10. Хоменко, Ю.П. Математическое моделирование внутрибаллистических процессов в ствольных системах / Ю.П. Хоменко, А.Н. Ищенко, В.З. Касимов; Томский государственный университет, Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 1999. – 256 с. – ISBN 5769202459.
11. Киняев А.А., Лапичев Н.В. Стенд для исследования высокоскоростных соударений. // Патент РФ на изобретение № 2653107. Бюл. №13, 2018.
12. Морфология повреждения толстостенных пластин-свидетелей фрагментами высокоскоростных ударников из различных материалов / П.Н. Калмыков, Н.В. Лапичев, И.А. Михайлов [и др.] // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 37-56.
13. Визуализация дульного выхлопа при выстреле из легкогазовой пушки / С. Герасимов, В. Ерофеев, И. Каньгин [и др.] // *Научная визуализация*. – 2014. – Т. 6. – № 2. – С. 92-103.
14. PIVview: user manual / PIVTEC: web-site of the PIVTEC GmbH (Particles, Imaging and Velocimetry). Gottingen, Germany. 2021. URL: <http://www.pivtec.com>.

Registration of Displacement and Visualization of the Deformation Field of a Cylindrical Shell under its Shock-Wave Loading

S.I. Gerasimov^{1,A,B,C,D}, K.V. Totyshev^{2,A}, N.A. Trepalov^{3,A}, R.V. Gerasimova^{4,B}

^A Russian Federal Nuclear Center All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188 Russia

^B Sarov State Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University MEPhI, Sarov, Nizhny Novgorod region, 607186 Russia

^C Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, 603950 Russia

^D Institute for Problems of Mechanical Engineering, Institute of Applied Physics, Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603024 Russia

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

² ORCID: 0000-0002-6232-505X, ktotyshev@bk.ru

³ ORCID: 0000-0001-5703-9027, natrepalov@mail.ru

⁴ ORCID: 0000-0002-2711-3975, r.v.gerasimova@mail.ru

Abstract

This paper discusses and demonstrates the approach to the registration of the elastic deformations and vibrations of the barrel of a light-gas gun based on high-speed video recording and the subsequent processing of the obtained images by a cross-correlation algorithm. The use of high-speed video recording of the cylindrical shell surface and cross-correlation analysis of the obtained images allows determining the space-time dependencies of the movement of the recorded surface and visualizing the deformation field. The approach is demonstrated by the example of high-speed video recording of a fragment of the barrel of a light-gas gun LGG-5,6 in the process of firing. Vibrations of the barrel in the vertical and horizontal directions were recorded, the maximum amplitude value of which was 5 mm. We also visualize for analysis the field of longitudinal elastic deformations of the barrel caused by the passage of the striker through the barrel channel.

Keywords: visualization, cross-correlation algorithm, deformation, elastic vibrations of the barrel, internal ballistics.

References

1. Adrian, R.J. Twenty years of particle image velocimetry. // Experiments in Fluids. 2005. Vol. 39. No. 2. P. 159-169.
2. Znamenskaya, I.A. Methods of digital analysis of images of liquid and gas-plasma flows based on cross-correlation processing / I.A. Znamenskaya, E.Yu. Koroteeva, F.N. Glazyrin // Scientific Visualization. - 2018. - Vol. 10. - No. 4. - p. 111-119. - DOI 10.26583/sv. 10. 4. 08.
3. Yagodnitsyna, A.A. Visualization of the flow in an evaporating drop on a substrate using the micro-PIV method / A.A. Yagodnitsyna, A.V. Bilsky, O.A. Kabov // Scientific visualization. - 2016. - Vol. 8. - No. 2. - p. 53-58.
4. Experimental study of the motion of a striker in a sandy medium by a non-contact method / S. I. Gerasimov, A.V. Zubankov, V.I. Erofeev [et al.] // Applied Mechanics and Technical Physics. - 2021. - Vol. 62. - № 1(365). - PP. 159-164 - DOI 10.15372 / PMTF20210117.
5. Modeling and visualization of an explosion in sandy soil. Calculation and experiment / V.A. Kuzmin, V.A. Kikeev, S.I. Gerasimov [et al.] // Scientific Visualization. - 2020.- Vol. 12. - No. 3. - pp. 79-88. - DOI 10.26583/sv. 12. 3. 07.

6. Osintsev, A.V. Visualization of displacements and deformations by the method of digital image correlation / A.V. Osintsev, K.Yu. Points / Scientific Visualization. - 2016. - Vol. 8. - No. 2. - p. 15-23.
7. Mineev, S.A. Analysis of speckle images of deformable surfaces based on optical flow processing algorithms / S.A. Mineev, A.Yu. Ugolnikov, L.B. Lozovskaya // Bulletin of the Lobachevsky Nizhny Novgorod University. - 2014. - No. 2-1. - pp. 81-86.
8. Orlov B.V., Larman E.K., Malikov V.G. Device and design of artillery barrels: monograph. Moscow: Mashinostroenie, 1976. 432 p.
9. Serebryakov M.E. Internal ballistics of barrel systems and powder rockets. Moscow: Oborongiz, 1962. 705 p.
10. Khomenko, Yu.P. Mathematical modeling of intra-ballistic processes in stem systems / Yu. P. Khomenko, A.N. Ishchenko, V.Z. Kasimov; Tomsk State University, Research Institute of Applied Mathematics and Mechanics. - Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1999. - 256 p. - ISBN 5769202459.
11. Kinyaev A.A., Lapichev N.V. Stand for the study of high-speed collisions. // Patent of the Russian Federation for invention No. 2653107. Byul. No. 13, 2018.
12. Morphology of damage to thick-walled witness plates by fragments of high-speed strikers made of various materials / P.N. Kalmykov, N.V. Lapichev, I.A. Mikhailov [et al.]// Mechanics of composite materials and Structures. – 2019.- T. 25. - No. 1. - P. 37-56.
13. Visualization of the muzzle exhaust when fired from a light-gas gun / S. Gerasimov, V. Erofeev, I. Kanygin [et al.] // Scientific visualization. - 2014. - Vol. 6. - No. 2. - P.92-103.
14. PIVview: user manual / PIVTEC: web-site of the PIVTEC GmbH (Particles, Imaging and Velocimetry). Gottingen, Germany. 2021. URL: <http://www.pivtec.com>.