

УДК 533.6.011

РЕЗУЛЬТАТЫ КОЛИЧЕСТВЕННОГО АНАЛИЗА ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ТЕНЕВОЙ СЪЕМКИ ТЕЧЕНИЙ В УДАРНОЙ ТРУБЕ ПРИ ПОМОЩИ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ И ОБУЧЕНИЯ

© 2021 г. И. А. Знаменская¹, И. А. Дорощенко^{1,*}, Н. Н. Сысоев¹, Д. И. Татаренкова^{1,**}

Представлено академиком РАН О.В. Руденко 11.02.2021 г.

Поступило 11.02.2021 г.

После доработки 11.02.2021 г.

Принято к публикации 15.02.2021 г.

Описаны результаты исследований нестационарных газодинамических течений в канале ударной трубы длительностью до 6 миллисекунд, полученные непрерывной высокоскоростной теневой съемкой и последующей обработкой больших данных – на основе машинного зрения (выделение границ и преобразование Хафа) и машинного обучения (сверточная нейронная сеть). Исследовалась с частотой съемки 150 тыс. к/с качественно и количественно эволюция разрывных потоков в прямоугольном канале ударной трубы за ударной волной с числами Маха от 2 до 3.5; построены зависимости угла наклона косого скачка уплотнения от времени, оценено время выхода течений на дозвуковой режим. Показана возможность проведения исследований в газодинамике на основе анализа больших данных цифровой съемки с помощью предложенного подхода.

Ключевые слова: визуализация течений, распознавание ударных волн, выделение границ (краев), сверточные нейронные сети, преобразование Хафа, ударная труба, псевдоскачки, косые скачки, высокоскоростная теневая съемка

DOI: 10.31857/S2686740021020127

Список областей, в которых в последние годы нашли применение нейронные сети, огромен. Важнейшим приложением для глубокого обучения на основе нейронных сетей является визуализация. В физике и механике переход от пленочных технологий [1] регистрации динамических процессов к цифровым [2] технологиям привел к многократному увеличению объемов визуальной информации. При этом теневой метод визуализации и его модификации продолжают оставаться основным, широкодоступным инструментом исследования сверхзвуковых и гиперзвуковых течений газа.

Для получения количественных данных о динамических характеристиках разрывов и неоднородностей в нестационарных процессах возникает необходимость обработки и расшифровки больших объемов данных теневой визуализации, полученных с использованием различных цифровых камер. Высокоскоростная съемка пленочными камерами (такими как СФР, ВСК и др.) позволяла

получить за 1 эксперимент менее 50 кадров – изображений последовательных стадий быстропротекающего процесса. Начальные стадии нестационарных процессов в ударных трубах прямоугольного сечения достаточно хорошо были исследованы с помощью таких камер. Цифровая камера сегодня позволяет зарегистрировать фильмы, ограниченные по объему информации лишь объемом памяти носителя или длительностью нестационарного исследуемого процесса. Основным параметром, характеризующим высокоскоростную цифровую теневую съемку, является пропускная способность – объем цифровых пиксельных данных изображения, формируемый камерой.

Для обнаружения ударной волны (УВ) на теневом изображении подходят различные алгоритмы обнаружения краев (границ) [3], в том числе алгоритмы Prewitt, Roberts, Sobel и Canny [4]. Ли и др. [5] разработали программное обеспечение для обнаружения и отслеживания ударных волн с помощью модифицированного алгоритма Canny. Перед обработкой изображения дополнительно улучшались с помощью вычитания фонового изображения в частотном представлении (с помощью быстрого преобразования Фурье). Аналогичные работы проводились для отслеживания различ-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail: doroshenko.igor@physics.msu.ru

**E-mail: tatarenkova.darya@yandex.ru

ных структур газодинамических течений в работах [6–8].

Нами проведена работа по адаптации и созданию программ распознавания структурных элементов в сплошных средах, на основе больших массивов данных панорамной теневой визуализации течений. Было создано программное обеспечение для автоматического отслеживания координат и размеров структур течений в автоматическом режиме с помощью алгоритмов выделения границ (краев), что позволило обрабатывать большие массивы экспериментальных данных (теневых и шпирен-изображений) без участия человека. ПО разработано на основе пакета MATLAB и алгоритма Canny. Часто УВ представляет собой прямую, которую можно обнаружить на изображении с помощью преобразования Хафа.

В настоящей работе метод Хафа впервые был использован для автоматического обнаружения УВ на теневых изображениях. Использовалась реализация данного алгоритма в MATLAB [9]. Также было разработано отдельное приложение, позволяющее классифицировать течения и распознавать на них структуры, такие как ударные волны, струи, термики, вихри и др., с помощью сверточных нейронных сетей (англ. convolutional neural network, CNN). Нейронная сеть обучалась на базе экспериментальных изображений. Точность классификации типовых течений достигала 99%. Используемая в данной работе модель обучена распознавать три класса объектов: ударные волны, термики и частицы-трассеры. Приложение написано на языке Swift с использованием библиотек Core ML и Vision. Разработанное ПО тестировалось для обработки теневых кадров с ударно-волновыми течениями и конвективными потоками (термиками) со значительными градиентами плотности среды, показана достаточно высокая эффективность предложенного подхода [10]. Созданное ПО позволило обрабатывать и в автоматическом режиме строить графики зависимости координат ударных волн, частиц-трассеров, размеров конвективных термик от времени, в том числе для нескольких объектов на одном изображении, а также автоматически вычислять угол наклона косоугольного скачка уплотнения.

Съемка высокоскоростной цифровой камерой на стенде УТРО-3 [11, 12] позволила получать большое количество фильмов, регистрирующих нестационарные процессы в канале ударной трубы сечением 24×48 мм с импульсным энергоподводом на основе лазерной теневой схемы. Для получения полной картины эволюции газодинамического потока и анализа возможностей моделирования различных нестационарных взаимодействий на стенде была проведена съемка и визуализирован весь поток, включая падающую УВ (числа Маха 2–3.5), нарастание пограничного слоя, турбулентное те-

чение толкающего газа (гелия), течение разрежения, а также отраженные разрывы. Частота съемки составляла 150–600 тыс. к/с; длительность цифровых фильмов – несколько миллисекунд. Обработка и количественные измерения проведены на основе разработанного ПО: машинного зрения (выделение границ и преобразование Хафа) и машинного обучения (сверточная нейронная сеть). Один фильм в виде набора изображений (до 1000 кадров) в формате .png, расположенных в одной директории, анализируется 3–10 с.

На графике (рис. 1) приведены результаты измерения на основе нейронной сети координат разрывов (точки), выявленных при анализе теневых изображений потока в рабочей камере ударной трубы. Между падающей УВ с числом Маха $M = 3.5$ и отраженной от уступа при входе в цилиндрический канал интервал времени около 3000 мкс. Скорость первого отраженного скачка, движущегося по сверхзвуковой области развитой турбулентности, измеренная автоматически – 80 ± 10 м/с. За счет взаимодействия пограничного слоя с отраженным скачком происходит бифуркация скачка и образуется цуг псевдоскачков, они проходят навстречу потоку через 100–200 мкс с той же скоростью. Затем зафиксирован проход второй отраженной от дальнего уступа ударной волны. Она движется по дозвуковой области и ее измеренная скорость – значительно выше, чем у первой – 350 ± 10 м/с.

Скорость набегающего потока в канале была измерена также на основе машинного обучения по движению трассеров (на графике рис. 1 – треугольники). Показано, что после прохождения отраженной волны и псевдоскачков скорость потока существенно падает (от 270 до 170 м/с), при этом пропадают косые скачки от неоднородностей стенок канала, что свидетельствует о переходе к дозвуковому течению.

На рис. 2 приведено изображение участка потока с распознанными конфигурациями псевдоскачков [13] (поток движется слева направо, цуг псевдоскачков – справа налево). Следует отметить, что до настоящего времени было проведено лишь несколько исследований по регистрации и анализу динамики подобного цуга псевдоскачков внутри ударной трубы – преимущественно путем измерения давления на стенке трубы [14].

Также на основе выделения границ и преобразования Хафа были по теневым фильмам проведены измерения эволюции угла наклона косоугольного скачка уплотнения от препятствия на стенке канала ударной трубы (рис. 3).

Таким образом, измерялась эволюция скорости набегающего потока и время выхода течения в канале на дозвуковой режим. На рис. 4 приведен график зависимости угла наклона косоугольного скачка уплотнения полуконического течения около то-

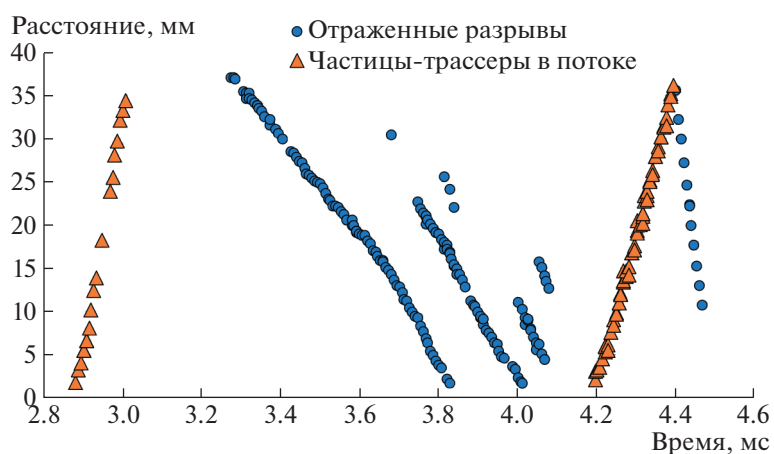


Рис. 1. Автоматически измеренные с помощью нейронной сети координаты разрывов и частиц-трассеров.

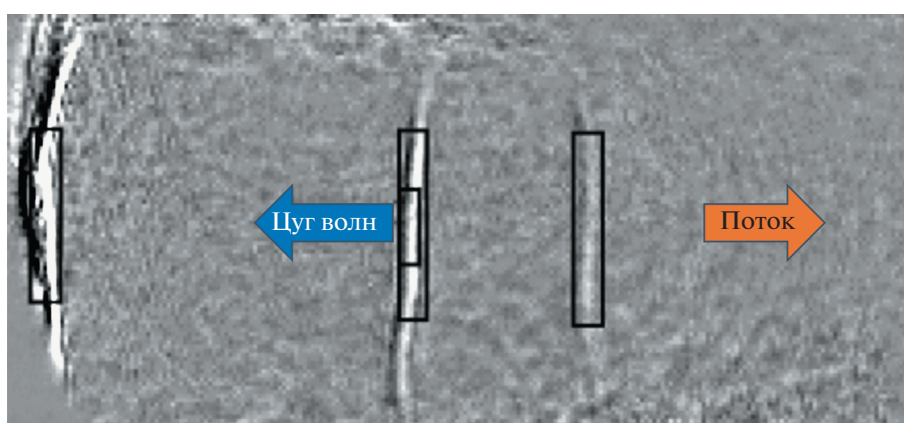


Рис. 2. Теневое изображение цуга псевдоскачков и их автоматическое распознавание при помощи сверточной нейронной сети.

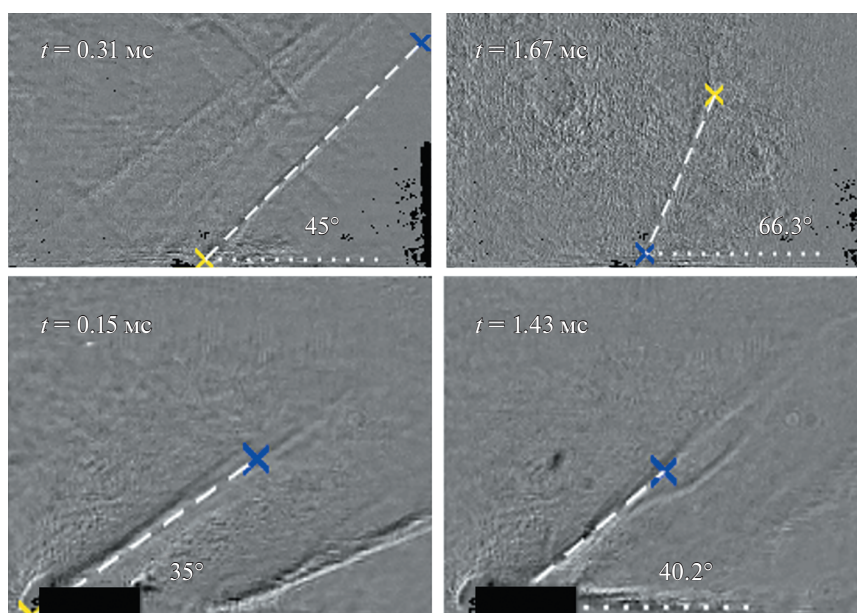


Рис. 3. Автоматически распознанный скачок уплотнения и рассчитанный угол наклона. Верхняя строка – для точечного препятствия; нижняя строка – прямоугольное препятствие, черным обозначены границы препятствия.

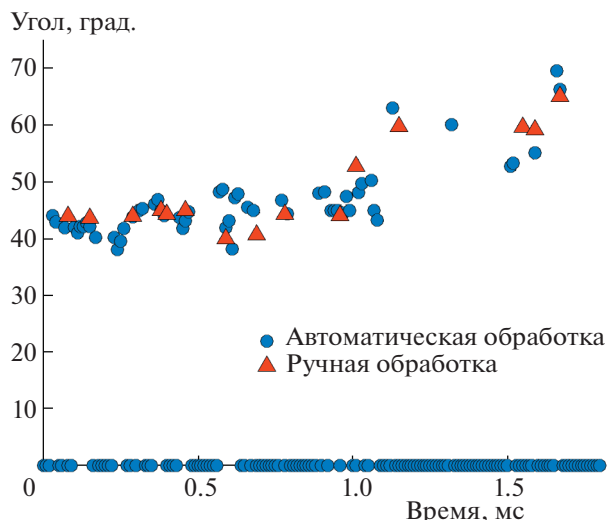


Рис. 4. График зависимости угла наклона скачка уплотнения конического течения около точечного препятствия от времени.

чечного препятствия на нижней стенке канала от времени, данные получены с помощью описанных алгоритмов машинного зрения и сравниваются с ручной обработкой.

В линейном приближении величина, обратная синусу угла наклона скачка в ламинарном течении, близка к числу Маха набегающего потока. Измеренный по 100–150 теневым кадрам угол наклона конического (точечное препятствие, рис. 3, верхняя строка) и плоского (прямоугольное препятствие, рис. 3, нижняя строка) течения увеличивался, приближаясь к прямому углу, а интенсивность скачка падала, и он пропадал; при приближении угла наклона к 90° течение становится трансзвуковым. Достижение скачком уплотнения вертикального положения (угол 90° и число Маха потока порядка 1), соответствует переходу скорости течения от трансзвуковой к дозвуковой (через 2.5–3.5 мс).

Таким образом, с использованием машинного зрения (выделение границ, преобразование Хафа и др. алгоритмы) и машинного обучения (сверточная нейронная сеть) возможно проведение исследований в газодинамике на основе анализа больших данных цифровой съемки с многократным ускорением получения новой физической информации.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 18-19-00672).

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина». Тата-

ренкова Дарья является стипендиатом фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов С.И., Кузьмин В.А., Кикеев В.А., Трепалов Н.А. Расчетно-экспериментальное исследование ударно-волнового нагружения оптически прозрачных тел // ЖТФ. 2019. № 9. С. 1319–1324.
2. Храмов П.П., Васецкий В.А., Грищенко В.М., Дорошко М.В., Черник М.Ю., Махнач А.И., Ших И.А. Диагностика полей плотности фотометрическим теневым методом при гиперзвуковом обтекании конуса в легкогазовой баллистической установке // ЖТФ. 2019. № 10. С. 1506–1512.
3. Cui S., Wang Y., Qian X., Deng Z. Image Processing Techniques in Shockwave Detection and Modeling // J. Signal and Information Processing. 2013. V. 4. № 3B. P. 109–113.
4. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V. PAMI-8. № 6. P. 679–698.
5. Li G., Burak Agir M., Kontis K., Ukai T., Rengarajan S. Image Processing Techniques for Shock Wave Detection and Tracking in High Speed Schlieren and Shadowgraph Systems // J. Physics: Conference Series. 2019. V. 1215.
6. Estruch D., Lawson N.J., MacManus D.G., Garry K.P., Stollery J.L. Measurement of shock wave unsteadiness using a high-speed schlieren system and digital image processing // Review of Scientific Instruments. 2008. V. 79. № 12.
7. Fujimoto T.R., Kawasaki T., Kitamura K. Canny-Edge-Detection/Rankine-Hugoniot-conditions unified shock sensor for inviscid and viscous flows // J. Computational Physics. 2019. V. 396. P. 264–279.
8. Srisha Rao M., Jagadeesh G. Visualization and Image Processing of Compressible Flow in a Supersonic Gaseous Ejector // J. of the Indian Institute of Science. 2013. V. 93. № 1. P. 57–66.
9. MathWorks. Hough Transform—MATLAB & Simulink, [Online]. Available: https://www.mathworks.com/help/images/hough-transform.html?search-Highlight=hough%20transform&s_tid=srchtitle. [Accessed 15 1 2021].
10. Znamenskaya I., Doroshchenko I., Tatarenkova D. Edge detection and machine learning approach to identify flow structures on schlieren and shadowgraph images // Proc. of the 30th International Conference on Computer Graphics and Machine Vision. CEUR Workshop Proceedings. 2020. V. 2744. Paper15–1–paper15–14.
11. Znamenskaya I., Mursenkova I., Doroshchenko I., Ivanov I. Flow analysis of a shock wave at pulse ionization: Riemann problem implementation // Physics of Fluids. 2019. V. 31. № 11.
12. Знаменская И.А., Мурсенкова И.В., Дорошенко И.А. Высокоскоростная цифровая регистрация плазмогазодинамических процессов в сверхзвуковых течениях в канале // Научная визуализация. 2019. Т. 11. № 3. С. 54–63.

13. Докукина О.И., Терентьев Е.Н., Штеменко Л.С., Шугаев Ф.В. Сеточная турбулентность и ее взаимодействие с ударной волной // ДАН. 2017. Т. 477. № 5. С. 537–541.
14. Kim D.W., Kim T.H., Kim H.D. A study on characteristics of shock train inside a shock tube // Theoretical and Applied Mechanics Letters. 2017. V. 7. № 6. P. 366–371.

RESULTS OF QUANTITATIVE ANALYSIS OF HIGH-SPEED SHADOWGRAPHY OF FLOWS IN SHOCK TUBE USING COMPUTER VISION AND MACHINE LEARNING

I. A. Znamenskaya^a, I. A. Doroshchenko^a, N. N. Sysoev^a, and D. I. Tatarenkova^a

^a Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Presented by Academician of the RAS O.V. Rudenko

The paper presents the results of unsteady gas-dynamic flows studies in the shock tube channel up to 6 milliseconds duration. Results were acquired by continuous high-speed shadowgraphy and subsequent big data processing based on computer vision (edge detection and Hough Transform) and machine learning (convolutional neural network, CNN). The evolution of flows with discontinuities in the rectangular shock tube channel behind the shock wave with Mach numbers 2–3.5 was studied with a recording frame rate of 150 thousand fps; the angle of oblique shock inclination vs time was plotted, the time for the flow to extend to the subsonic regime was estimated. The possibility of conducting the gas dynamics researches based on the analysis of digital big data using the considered computer vision and machine learning approaches is presented.

Keywords: flow visualization, shock wave detection, image edge detection, convolutional neural networks, Hough transform, shock tube, shock train, oblique shock waves, high-speed shadowgraph imaging