

Новые подходы к визуализации и анализу течений в ударных трубах

Д.И. Долбня,^{1,*} И.А. Дорощенко,¹ И.А. Знаменская,¹ М.И. Муратов¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 25.12.2024; подписана в печать 23.01.2025)

В данной работе представлены новые подходы к исследованию газодинамических процессов в ударных трубах с использованием современных методов визуализации и анализа. Проводились исследования течения за ударной волной в прямоугольном канале ударной трубы постоянного сечения и в канале с препятствием. Эксперименты включают использование высокоскоростной цифровой съемки, инфракрасной термографии, метода трассирования, позволяющих с высокой временной и пространственной разрешающей способностью анализировать эволюцию течения в ударной трубе. Полученные результаты показали, что поток в канале ударной трубы может быть использован для исследований в течение 20–25 мс, что значительно превышает ранее использовавшиеся временные диапазоны. Возможно проведение экспериментов, включая исследования тепломассообмена, связанного с обтеканием стенок канала, препятствий с инициированием импульсных разрядов в потоке. Представлены результаты исследования эволюции параметров потока. Показано, что использование методов машинного обучения и компьютерного зрения, в том числе сверточных нейронных сетей, позволяет эффективно обрабатывать и анализировать большие массивы данных, полученных при высокоскоростной регистрации.

PACS: 07.35.+k, 07.05.Mh, 07.60.-j, 51.90.+g УДК: 53.07, 533.06

Ключевые слова: ударная труба, газодинамическое течение, теневой метод, высокоскоростная регистрация, нейронные сети, компьютерное зрение, инфракрасная термография, визуализация течений.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2531001

1. ВВЕДЕНИЕ

Ударные трубы уже несколько десятилетий служат важным инструментом для экспериментального моделирования задач высокоскоростной газовой динамики [1]. Различные типы ударных труб представляют собой ключевые установки для исследований, связанных с нестационарными взаимодействиями ударных волн, высокотемпературными потоками, детонационными процессами. В них могут быть созданы уникальные условия, позволяющие детально изучать кинетику газов, пограничный слой, а также отрабатывать методы диагностики при сверхзвуковых скоростях [2–4].

В однодиафрагменной ударной трубе сверхзвуковой поток газа возникает, когда разрывается диафрагма, которая разделяет два газа в камерах с высоким и низким давлением [5]. Этот процесс начинается с того, что разрыв диафрагмы позволяет легкому газу, находящемуся под высоким давлением, вытекать в область с низким давлением. Перед потоком газа в камере с низким давлением формируется ударная волна, в противоположную сторону движется волна разрежения. При этом важно отметить, что скорости толкаемого газа и толкающего газа на контактной поверхности равны. Так как

камера высокого давления обычно значительно короче камеры низкого давления, волна разрежения быстро достигает торца трубы и, отразившись от него, начинает двигаться в том же направлении, что и ударная волна. На рис. 1 даны схематическое изображение ударной трубы (рис. 1, а), распределение давления по длине трубы до (рис. 1, б) и после (рис. 1, в) разрыва диафрагмы и графики движения ударной волны, контактной поверхности и волны разрежения (рис. 1, г).

На фронте ударной волны, ширина которой сопоставима с длиной свободного пробега молекул, газодинамические параметры претерпевают резкий скачок. При стационарном распространении ударной волны в ударной трубе параметры потока непосредственно за ударной волной (давление, плотность, скорость) однозначно определяются по законам сохранения скоростью ударной волны и состоянием газа перед ней при известном термодинамическом состоянии идеального газа, а именно соотношениями Ренкина–Гюгонио:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} \cdot M^2 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1}, \quad (1)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma_1 + 1) \cdot M^2}{(\gamma_1 - 1) \cdot M^2 + 2}, \quad (2)$$

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{2}{\gamma_1 + 1} \cdot \left(M - \frac{1}{M} \right), \quad (3)$$

индекс «1» — соответствует состоянию покоящегося газа перед ударной волной (1 на рис. 1), т.е.

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

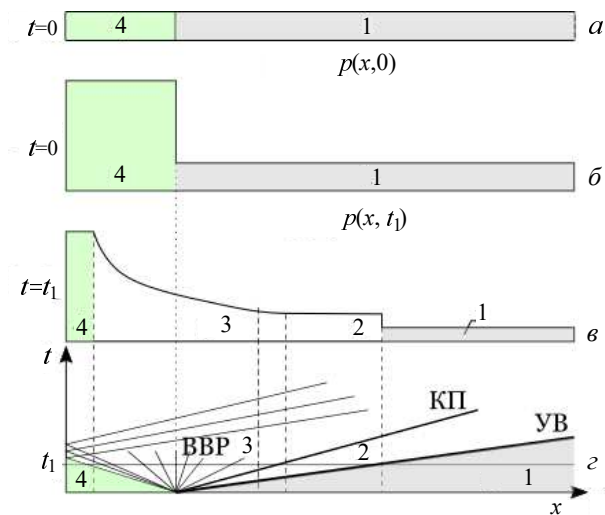


Рис. 1. *а* — Ударная труба: 1 — камера низкого давления, 4 — камера высокого давления; *б* — распределение давлений до разрыва диафрагмы $p(x, 0)$; *в* — распределение давлений через время t_1 после разрыва диафрагмы $p(x, t_1)$; *г* — x - t -диаграмма движения разрывов

в камере низкого давления, «2» — состояние газа в спутном потоке (2 на рис. 1). Между контактной поверхностью и хвостом веера волны разрежения ВВР расположена область разреженного толкающего газа обозначенная как область 3 на рис. 1, после которой некоторое время существует участок (4 на рис. 1) невозмущенного толкающего газа.

К числу локальных параметров, которые можно измерять, относятся распределение давления, которое фиксируется с помощью датчиков различных типов [6]. Кроме того, значительное количество информации можно получить, используя различные методы визуализации быстротекущих процессов [7]. Ударные трубы с прямоугольным сечением и интегрированными окнами позволяют визуализировать квазидвумерные потоки в канале с использованием различных оптических методов. В трубах с прямоугольным сечением поток остается до прихода контактной поверхности достаточно однородным вдоль зондирующего луча, что дает возможность проводить оптические наблюдения за потоком и отслеживать распределение параметров по сечению, поскольку стекла не нарушают конфигурацию канала. Теневые методы, шпирен-методы, интерферометрические методы обычно являются предпочтительными инструментами для визуализации ударных волн и потоков в таких трубах [7].

Ранее в ударных трубах для покадровой съемки потоков использовались пленочные регистраторы, обеспечивающие получение покадровых изображений быстротекущих процессов с ограниченным объемом данных, составляющим всего несколько десятков кадров. При этом скорость регистрации была достаточно высокой, что позволяло детально исследовать некоторый временной промежуток ударно-волнового течения. Несмотря на то, что

эта система обеспечивала удовлетворительное качество изображений, количество кадров, которое она могла захватить, было существенно ограничено [7]. Ввиду этого ударные трубы имели ограничения, связанные с малым рабочим временем исследований. Использовался преимущественно интервал между приходом в заданное сечение канала трубы ударной волны и контактной поверхности или другого газодинамического разрыва, например отраженной от торца камеры высокого давления волны.

В последние годы высокоскоростные цифровые камеры предоставляют возможность исследовать эволюцию поля потока за ударной волной в течение нескольких миллисекунд, при этом обеспечивая высокое пространственное и временное разрешение [8, 9]. Высокоскоростная цифровая регистрация существенно расширяет возможности проведения экспериментов в ударной трубе [9, 10]. В частности, в предыдущих работах были представлены исследования на ударных трубах по эволюции пограничного слоя в сверхзвуковом и трансзвуковом потоках за ударной волной в течение 10 – 12 мс после прохождения ударной волны [11].

Данная работа посвящена новым подходам к методам визуализации и анализа квазидвумерных потоков, возникающих за фронтом ударной волны. С точки зрения методов визуализации акцентируется внимание на использовании теневых, трассерных и тепловизионных методов для визуализации течений с помощью современных высокоскоростных цифровых камер, которые на выходе одного эксперимента дают тысячи кадров. Таким образом, для анализа больших данных (изображений) становится необходимо привлекать машинное зрение, машинное обучение.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА. ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Экспериментальная установка представляет собой однодиафрагменную ударную трубу УТРО-3 (Ударная труба-Разряд-Оптика, рис. 2), предназначенную для глубокого изучения газодинамических и плазмодинмических течений в различных условиях. Одним из ключевых преимуществ использования ударной трубы является возможность создания контролируемых условий распространения разрывов. Это позволяет изучать различные газодинамические структуры и неоднородности, которые могут возникнуть в процессе обтекания препятствий в рабочей камере стенда.

Труба разделена на две секции: камеру высокого давления (КВД) длиной 54 см и внутренним диаметром 40 мм, а также камеру низкого давления (КНД) сечением 24 мм×48 мм. Эти две камеры разделены диафрагмой, материалы которой могут варьироваться по плотности, что позволяет управлять характеристиками создаваемой ударной волны и потоком за ней (рис. 2). Камера низкого давления оборудована форвакуумным насосом, ко-

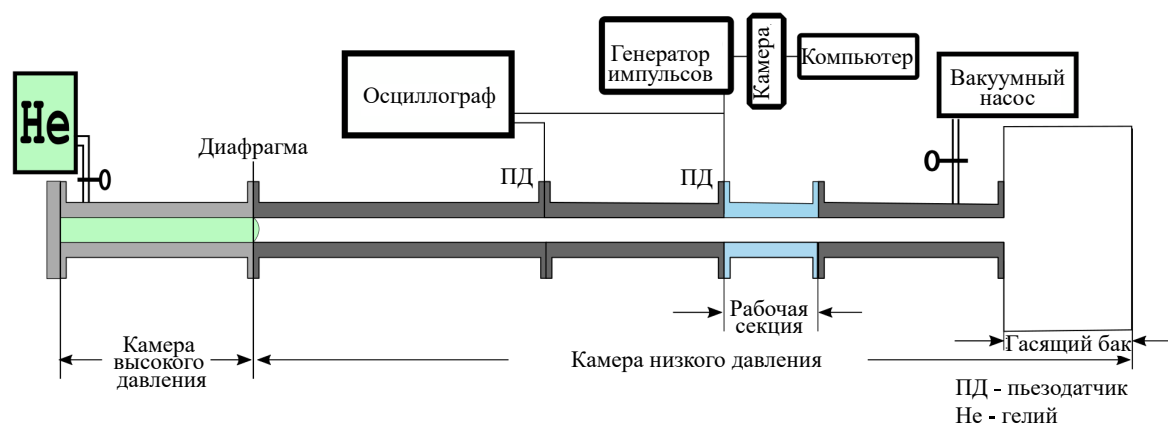


Рис. 2. Экспериментальная установка — ударная труба

торый откачивает воздух. В камере высокого давления — газовая смесь, представляющая собой гелий с некоторым количеством остаточного воздуха. Высокое давление доводится до критического значения 4–8 атм, после чего происходит разрыв диафрагмы.

Между КВД и КНД расположена переходная секция длиной 9.5 см, предназначенная для преобразования формы поперечного сечения из круглого в прямоугольное. Камера низкого давления далее будет именоваться газодинамическим каналом или просто каналом. До момента разрыва диафрагмы газ с обеих сторон остается в покое. Откачивание газа из секции низкого давления обычно продолжается достаточно долго, что приводит к выравниванию температуры трубы и газа в ней с температурой окружающей среды (T). Из изложенной экспериментальной постановки следует, что скорость распространения УВ определяется прежде всего соотношением давлений на диафрагме и ее толщиной. Варьирование толщины диафрагмы позволяет, в свою очередь, управлять разностью давлений между газами в камерах (КВД и КНД).

Скорость УВ определялась при помощи двух пьезодатчиков давления (ПД) (рис. 2), установленных на определенном расстоянии друг от друга $L_{12} = 103$ см. Принцип работы пьезодатчиков основывается на пьезоэффекте: при воздействии давления при проходе УВ на рабочую среду в пьезоэлектрических датчиках генерируется электрический заряд, преобразовываясь в напряжение. Датчики подключены к цифровому осциллографу; импульс с пьезодатчиков давления, получаемый при проходе УВ, позволяет не только определить скорость движения фронта УВ, но и синхронизировать многие процессы, например момент начала регистрации высокоскоростной камерой. Так, сигнал независимо регистрируется дважды на цифровом осциллографе. Так как расстояние L_{12} между ПД известно, скорость УВ может быть рассчитана как $U = L_{12}/\Delta t$, где Δt — задержка в регистрации сигналов между ПД и обычно составляет 600–1100 мкс (время, необходимое для прохождения фронтом УВ участ-

ка канала длиной L_{12}).

На расстоянии 210 см от диафрагмы в канал без искажения внутреннего сечения интегрирована рабочая (разрядная) секция, в которой может быть инициирован импульсный объемный разряд с УФ предыонизацией от плазменных листов. Боковые стенки секции представляют собой прозрачные окна. Эти окна обеспечивают панорамную визуализацию течения (область наблюдения $x = 2.2–2.3$ м). Окна выполнены из кварцевого стекла с высоким коэффициентом пропускания УФ- и ИК-излучения. Также кварцевое стекло характеризуется низким коэффициентом теплового расширения.

Для регистрации газодинамического течения используется теневой метод, который дает возможность визуализировать сложные потоки, включая сверхзвуковые течения (например, [12]). Этот метод основывается на изменении направления световых лучей при прохождении через области с различной плотностью, таким образом, позволяя получать изображения последовательных стадий разрывного течения без прямого контакта с ней, что является важным для анализа газодинамических процессов [7]. Теневой метод широко используется в газодинамических исследованиях, изучении взрывов, а также в других областях, где необходимо визуализировать высокоскоростное преимущественно квазидвумерное течение газов [12].

Регистрация газодинамического течения, визуализированного с использованием теневого метода, осуществлялась с помощью высокоскоростной камеры Photron Fastcam SA5. Камера работала с частотой съемки от 100 до 150 кГц и имела время экспозиции 1 мкс, что обеспечивало получение четких и детализированных изображений динамических процессов в газовой среде.

Исследование тепловых полей внутри канала рабочей (разрядной) секции (регистрация теплового излучения от нижней поверхности канала) проводилось с помощью инфракрасной (ИК) камеры (тепловизора) Telops FAST M200. Спектральный диапазон камеры: 1.5–5.1 мкм, частота съемки достигает 5000 Гц, длительность экспозиции кадра — 0,2 мс.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ТЕЧЕНИЯ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Для регистрации УВ и потоков за ней традиционно использовались оптические системы, которые обеспечивали получение покадровых изображений, однако объем данных был ограничен десятками кадров, что существенно ограничивало возможности для анализа процессов с микросекундными характерными временами миллисекундной длительности. Это ограничение, в свою очередь, не позволяло исследователям получать полное представление о сложной динамике потоков, возникающих за ударными волнами в ударной трубе.

Развитие цифровых технологий позволило применять высокоскоростную видеосъемку и получать данные о движении газов с частотами до миллиона кадров в секунду. Высокоскоростные камеры с высокой чувствительностью и коротким временем экспозиции обеспечивают возможность регистрации всех быстропротекающих процессов в ударных трубах за время существования потока (рис. 5). Новые подходы позволяют решить одну из важных задач в теории ударной трубы: установление физических и математических зависимостей, связывающих физические величины, определяющие состояние газа в ударной трубе в начальный момент времени, с параметрами системы на произвольном участке течения.

Для исследования высокоскоростного газодинамического потока в канале применялись оптические (бесконтактные) методы и методы измерения скорости течения по трассерам. Эти частицы, которые могут как естественно присутствовать в потоке (беззасевные методы), так и быть специально введены, рассеивают свет и позволяют проводить измерения [11]. Из-за значительного различия в плотностях газа и частиц их скорости зачастую не совпадают, особенно в условиях высокоскоростных градиентных течений, таких как ударные волны в сверхзвуковых потоках.

Чтобы минимизировать это скоростное рассогласование между газом и трассирующими частицами, обычно стараются использовать наиболее мелкие фракции трассирующих частиц (микронных и субмикронных размеров). Панорамные измерения методом анемометрии по изображениям частиц (англ. PIV — Particle Image Velocimetry) свидетельствуют, что движение газа в канале, в частности с открытым торцом, продолжается до 12–15 мс после прохода ударной волны [11]. Измерения показали, что на более ранних стадиях (до 300 мкс) поток практически однороден и скорость газа существенно не меняется по сечению рабочей секции, а в более поздние моменты (500–600 мкс и далее) становится заметным замедление потока около стенок канала, связанное с развитием пограничного слоя. В течение 10–15 мс после прохождения плоской ударной волны поток в области наблюдения остаётся засеянным. Засев частиц в ударных трубах при откачке весьма сложен.

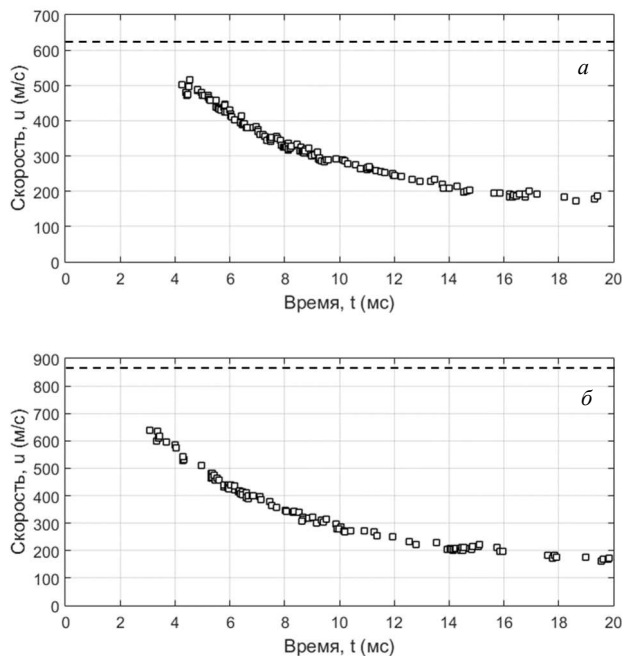


Рис. 3. Зависимости скорости течения в ударной трубе при числах Маха УВ $M = 2.5$ (а) и $M = 3.4$ (б) от времени; пунктирная линия — расчетное значение скорости спутного потока из соотношения 3

Более доступным и достаточно точным способом является метод трассирования мелкодисперсной среды, образующейся при разрыве диафрагмы. Нами анализировалось движение трассеров, формируемых от специальной диафрагмы, распадающейся при разрыве на мелкомасштабные элементы с характерным размером от 0.02 мм и толщиной порядка микрон (рис. 3). Начало массового движения элементов информировало о проходе контактного слоя, приходе толкающего газа: движение трассирующих частиц со скоростью близкой к скорости спутного потока, начавших свое движение от места разрыва диафрагмы, не могут быть обнаружены в воздушной пробке, непосредственно, за ударной волной. Также понятно, что трассеры имеют характерное время запаздывания $\Delta t'$, связанное преимущественно с большим начальным градиентом скорости, присутствующим в момент разрыва диафрагмы.

В результате высокоскоростной регистрации получены большие массивы экспериментальных данных. В рамках данной работы скорость регистрации кадров обычно устанавливалась на уровне 150 тысяч кадров в секунду. Это позволяет получить более 3000 кадров за один эксперимент, если продолжительность процесса составляет более 20 миллисекунд. Такой высокий уровень кадровой частоты обеспечивает детальную фиксацию динамических процессов и позволяет анализировать их с высокой точностью. Ввиду этого для обнаружения частиц (трассеров) применялось машинное зрение с предварительным обучением на большом количестве фильмов с фильтрацией. Кадры для обу-

чения модели дополнялись аугментациями: копиями оригинальных кадров с добавлением искусственного шума, изменениями яркости и четкости. Таким образом, увеличивался набор данных для обучения модели и качество ее обучения.

В предыдущих исследованиях (например, [13]) было разработано специализированное приложение для классификации течений и распознавания различных структур, таких как частицы-трассеры, ударные волны, струи, термики и вихри, с использованием сверточных нейронных сетей (англ. CNN) на основе архитектуры YOLO. Нейронная сеть обучалась на экспериментальных изображениях, что позволило достичь высокой точности распознавания объектов для типовых течений — до 99%. Приложение было реализовано на языке программирования Python с использованием библиотек PyTorch, OpenCV. Созданное ПО позволило обрабатывать и в автоматическом режиме строить графики зависимости координат частиц-трассеров от времени, в том числе для нескольких объектов на одном изображении, а также вычислять мгновенную скорость движения каждой частицы-трассера и выводить отдельные зависимости скорости от времени (рис. 3).

По анализу движения большого числа частиц были получены графики зависимости мгновенной скорости потока за ударной волной от времени. На рис. 3 представлены экспериментальные графики скорости, автоматически построенные после распознавания трассеров для $M = 2.5$ и $M = 3.4$. Зависимость представляет собой скорость трассеров, которые движутся с максимальной скоростью от времени. Скорость течения для спутного потока непосредственно за УВ рассчитана из соотношения Ренкина–Гюгонио 3. Характерное время реакции трассера на плавное изменение скорости составляет порядка микросекунды, поэтому допустимо мала неточность при определении скорости газодинамического потока. Таким образом, высокоскоростная цифровая регистрация позволяет получать из одного эксперимента десятки тысяч кадров, а длительность фильма достигает десятки миллисекунд.

Результаты данного исследования показывают, что поток в канале ударной трубы сохраняется в течение 20 – 25 мс. Длительность существования потока в канале ударной трубы позволяет исследователям проводить разнообразные эксперименты на протяжении всего этого времени.

Анализ большого объема экспериментальных данных показал, что очередность движения разрывов может варьироваться, приводя к различным сценариям, наблюдаемым в контрольной области (рабочей секции). Ввиду этого проводилось 1D-численное моделирование (см. 4). Были выделены три основных сценария развития течения за ударной волной в зависимости от числа Маха УВ M и начального давления в КНД. Так, сценарий, когда вер волн разрежения может наблюдаться за контактным слоем, осуществляется при самых низких давлениях газа в КНД — порядка 1–10 торр; при этом число Маха в эксперименте достигает своих макси-

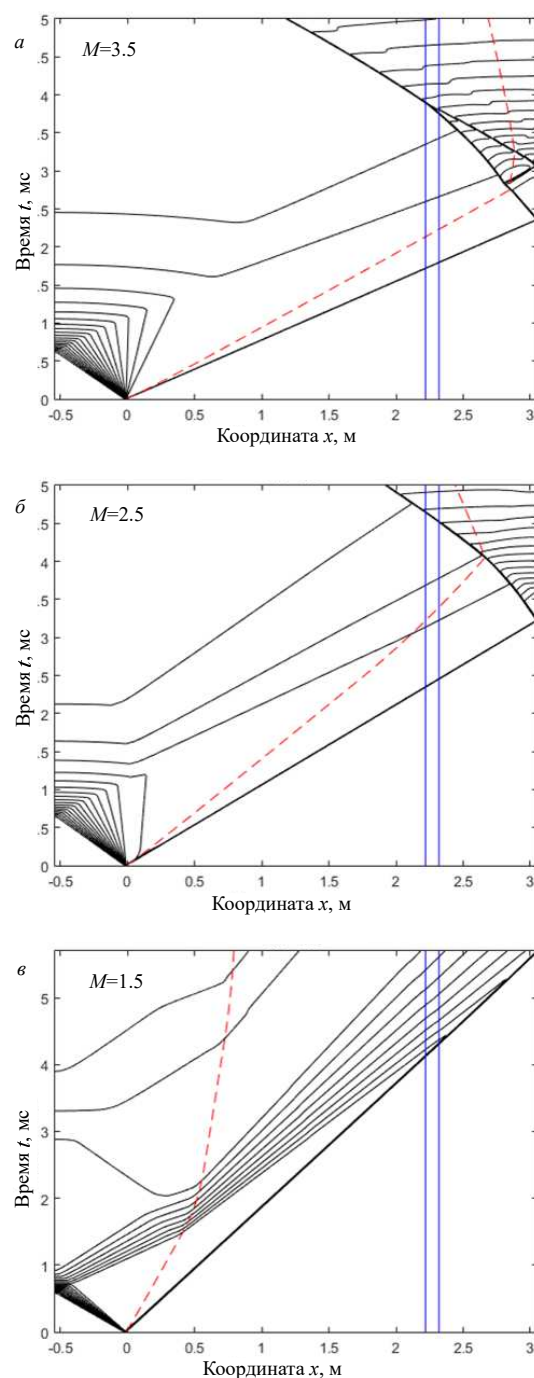


Рис. 4. Результаты 1D-моделирования потока в ударной трубе для чисел Маха ударной волны $M = 3.5$ (а), $M = 2.5$ (б) и $M = 1.5$ (в), представляющие 3 сценария эволюции течения за ударной волной соответственно; на координатах $x = 2.2 - 2.3$ м — окно наблюдения; пунктирная линия — контактная поверхность

мальных значений ($M = 5.5$). Численный эксперимент, соответствующий первому сценарию, приведен на рис. 4, а.

Также существует сценарий, когда в течение определенного времени спутный поток за фронтом УВ может сохранять стабильные параметры в точке наблюдения. Однако затем волна разрежения до-

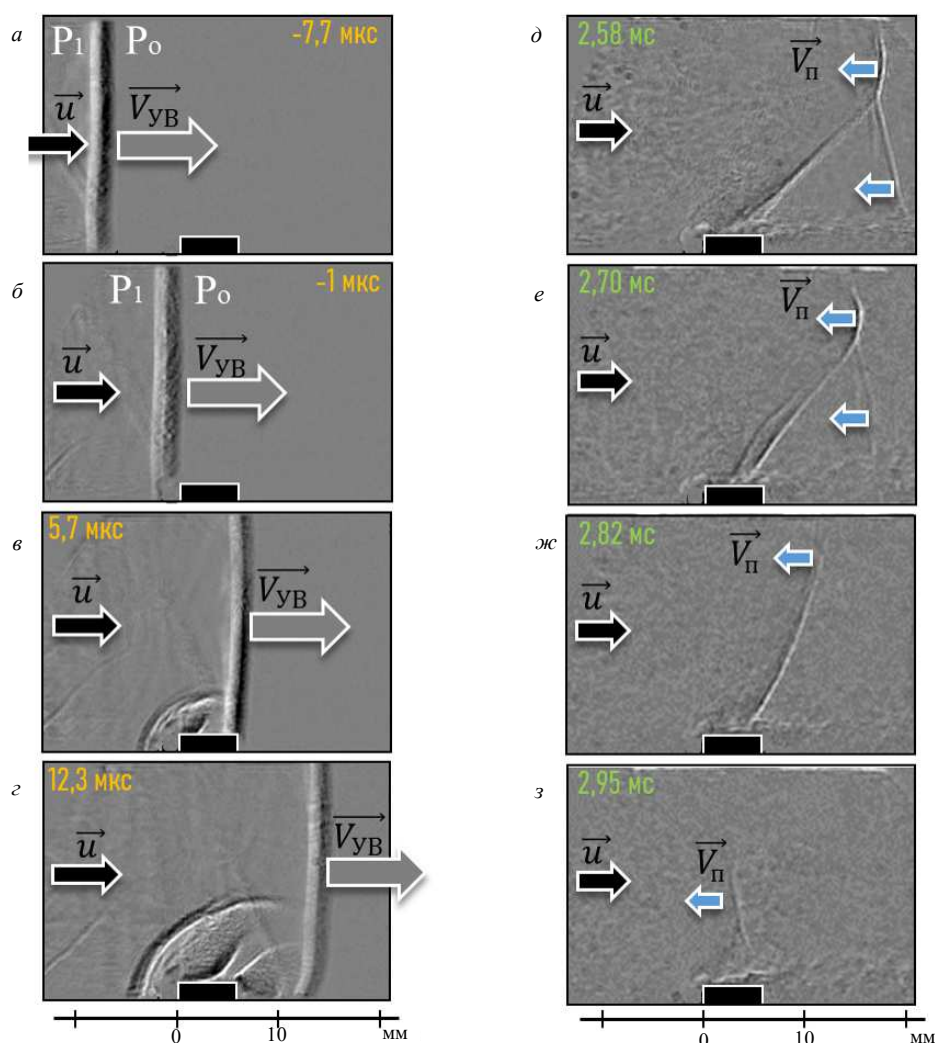


Рис. 5. (а-г) — Последовательные кадры ударной волны $M = 3.5$, $t = 0$, $dt = 6.6$ мкс (скорость регистрации 150 000 кадров/с, экспозиция 1 мкс) и (д-з) — возвратные псевдоскачки $t = 2.5$ мс, $dt = 120$ мкс,двигающиеся через профилированную область канала ударной трубы

стигает ее, опережая контактный слой и в том числе вызывает снижение скорости воздушной пробки (рис. 4, б). Численный эксперимент показал, что существование второго сценария возможно, в частности при небольшом повышении давления в КНД и при меньших числах Маха.

Существует также сценарий, при котором контактный слой, взаимодействуя с отраженной волной разрежения, значительно замедляется, не достигая рабочей секции (рис. 4, в). Сценарий реализуется при открытом торце канала, когда давление воздуха в КНД составляет 1 атм. При таких условиях число Маха УВ достигает $M = 1.5$; результаты 1D-моделирования представлены на рис. 4, в. Стоит отметить, что это замедление может повлиять на возможность достижения контактного слоя контрольной точки, что важно учитывать при анализе динамики процессов в газодинамических системах.

Проводились исследования течения за ударной волной в канале со вставкой на нижней стенке

в форме параллелепипеда размером $6 \times 2 \times 48$ мм³, применяемой для изменения профиля прямоугольного канала в области наблюдения. Когда первоначально плоская ударная волна (рис. 5, а-б) достигает профилированную область канала, наблюдается частичное отражение от выступа (рис. 5, в), затем происходит дифракция на обратном уступе (рис. 5, г) [2]. Дифракция ударной волны представляет собой сложный нестационарный процесс, требующий детального анализа для понимания его динамики и влияния на характеристики потока. Установка препятствия в канале, создающего профилированную область, приводит к формированию структурированного течения, характеризующегося наличием областей сжатия и разрежения, а значит, и зонами отрыва, и косыми скачками уплотнения.

Использование теневого метода позволило визуализировать сложные структуры потоков около препятствия и их динамику при изменении скорости потока от максимальной для данного числа Ма-

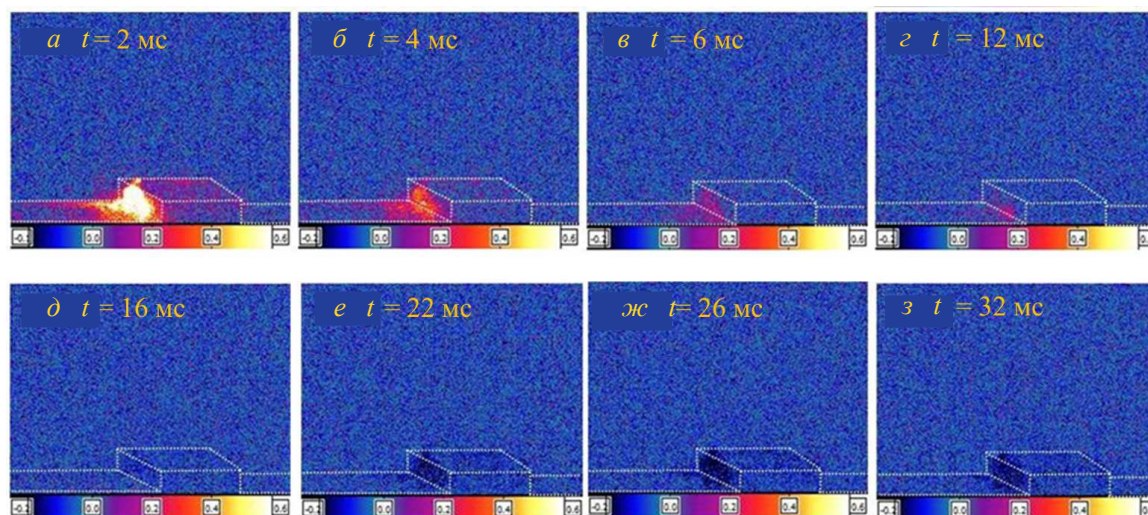


Рис. 6. Теплообменные процессы вблизи выступа в условиях газодинамического потока за ударной волной

ха ударной волны до нулевой. Наличие последовательных кадров на каждой стадии позволяет провести качественный анализ переходных процессов и выявить особенности. Так, после прохождения через препятствие (рис. 5, з) ударная волна вызывает резкие изменения давления и плотности, что приводит к образованию новых структур, таких как зоны отрыва и косые скачки. Это взаимодействие приводит к образованию сложной структуры ударных волн и изменению распределения плотности вокруг препятствия. Очевидно, что при этом возникают области с высоким давлением перед препятствием и зоны с пониженным давлением за ним, которые существенно меняются по мере изменения (снижения) скорости основного потока (рис. 5, в). Через 2.5–3 мс скорость потока падает, визуализируются медленно движущиеся навстречу потоку псевдоскачки.

Для исследования тепловых полей на стенках канала использовалась инфракрасная термография, что позволило проводить бесконтактное исследование распределения теплового излучения. Инфракрасная термография использовалась для экспериментального исследования динамики тепловых полей при обтекании стенок и препятствия на поверхности канала. Такое исследование позволяет получить данные о спутном потоке за препятствием и анализировать влияние различных факторов на процесс обтекания. Введение вставки в газодинамический поток вызывает значительный нагрев выступа с наветренной стороны ввиду интенсивного теплообмена в пограничном слое как следствие диссипации кинетической энергии потока в виде тепла. Нагрев выступающего элемента на поверхности канала в сверхзвуковом потоке зависит от нескольких ключевых факторов, а именно коэффициента теплопроводности материала, величины поверхности, особенно лобовой (большая площадь контакта с потоком увеличивает количество поглощенно-

го тепла), длительности высокоскоростного обтекания (продолжительность воздействия сверхзвукового потока на элементы конструкции влияет на их нагрев). Было отмечено, что с течением времени наблюдается достаточно быстрый нагрев, затем заметное охлаждение выступающей части препятствия в течении (рис. 6) [14]. Это может быть связано с приходом охлажденного течения газа в волне разрежения через 10–20 мс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты демонстрируют возможности в области визуализации и анализа высокоскоростных газодинамических процессов в ударных трубах. Использование современных методов, таких как высокоскоростная цифровая съемка, трассерные методы, инфракрасная термография, обеспечивает детализированную регистрацию процессов, происходящих в микро- и миллисекундных временных масштабах, что открывает новые возможности для многомасштабного исследования сложных структур течений за ударной волной. Показано, что достаточно однородный поток в канале ударной трубы сохраняется в течение 20–25 мс, что значительно превышает ранее использовавшиеся временные рамки. Это создает возможность для проведения экспериментов, включающих динамические процессы на всех стадиях течения, делая ударные трубы инструментом для изучения некоторых миллисекундных газодинамических процессов. Применение методов машинного обучения и компьютерного зрения продемонстрировало высокую эффективность при обработке больших данных визуализации, что позволяет значительно ускорить анализ динамики процессов.

Данная работа была поддержана грантом РНФ № 24-79-00029.

- [1] Рулева Л.Б. // *ФХК в газовой динамике*. **11**, 104406 (2011).
- [2] Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г., Лагутов Ю.П. и др. Нестационарные взаимодействия ударных и детонационных волн. 1986.
- [3] G. Sakthi Balan et al. // *Int J Impact Eng* **172**, 104406 (2023).
- [4] Фомин Н.А. // *Инж-физ.журнал* **183**, 1058 (2010). (Fomin N. A. // *J. Eng. Phys.* **83**, 1118 (2010)).
- [5] Штеменко Л.С. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **1**. 58 (1967).
- [6] Попов П.А., Монахов Н.А., Лапушкина Т.А. и др. // *ЖТФ* **92**, 1334 (2022). (Popov P. A. , Monakhov N. A., Lapushkina T. A. et al. // *Tech. Phys.* **9**. 1144 (2022)).
- [7] Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстротекущих процессов. 1964.
- [8] Kleine H. // *High-Speed Visualization of Compressible Flows – Potential and Limitations*. in book 29th International Symposium on Shock Waves. **1** 27, 030161 (2015).
- [9] MacLucas D., Skews B., Kleine H. // *Exp Fluids* **61** (2020)
- [10] Знаменская И.А. // *Науч. виз.* **13** 3 (2021). (Znamenskaya I.A. // *SciV.* **13** 3 (2021))
- [11] Znamenskaya I. A., Koroteeva E. Y. Timokhin M. Y. et al. // *AIP Conf Proc.* **2027**, 030161 (2018).
- [12] Kleine H, Gronig H., Takayama K. // *Opt Lasers Eng.* **44**, 170 (2006).
- [13] Знаменская И.А., Дорощенко И.А., Сысоев Н.Н. и др. // *ДАН.* **497** 16 (2021). (Znamenskaya I.A., Doroshchenko I. A., Sysoev N.N. et al. // *Dokl. Phys.* **66** (2021))
- [14] Знаменская И.А., Коротеева Е.Ю., Муратов М.И., и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.* **6** 85 (2022). (Znamenskaya I.A., Koroteeva E.Y., Muratov M.I. et al. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **6** 82 (2022))

New Approaches to Visualization and Analysis of Flows in Shock Tubes

D. I. Dolbnia^a, I. A. Doroshchenko, I. A. Znamenskaya, M. I. Muratov

¹Department of Molecular Processes and Extreme Matter States, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University

Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^atatarenkova.darya@yandex.ru

This paper presents new approaches to studying gas-dynamic processes in shock tubes using modern visualization and analysis methods. The flow behind the shock wave in a rectangular channel of a shock tube of constant cross section and in a channel with an obstacle was studied. The experiments include the use of high-speed digital shooting, infrared thermography, and a tracing method, which allow analyzing the evolution of the flow in the shock tube with high temporal and spatial resolution. The results showed that the flow in the shock tube channel can be used for research for 20–25 ms, which significantly exceeds the previously used time ranges. It is possible to conduct experiments, including studies of heat and mass transfer associated with flow around the walls of the channel, obstacles with the initiation of pulsed discharges in the flow. The results of a study of the evolution of flow parameters are presented. It is shown that the use of machine learning and computer vision methods, including convolutional neural networks, allows efficient processing and analysis of large arrays of data obtained during high-speed recording.

PACS: 07.35.+k, 07.05.Mh, 07.60.-j, 51.90.+r

Keywords: shock tube, gas-dynamic flow, shadow method, high-speed registration, neural networks, computer vision, infrared thermography, heating of protruding elements

Received 25 December 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2025. **80**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Долбня Дарья Илларионовна — канд. физ-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: tatarenkova.darya@yandex.ru.
2. Дорощенко Игорь Александрович — канд. физ-мат. наук, вед. инженер; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: doroshenko.igor@physics.msu.ru.
3. Знаменская Ирина Александровна — доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: znamen@phys.msu.ru.
4. Муратов Мурат Ильмдарович — аспирант; тел.: (495) 939-44-28, e-mail: muratov583@gmail.com.