

03
Исследование нестационарного воздушного потока в большой вакуумной камере с помощью стандартного ионизационного манометра

© С.В. Коробков, М.Е. Гуцин, А.В. Стриковский, К.Н. Лоскутов, А.А. Евтушенко

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: Korobkov@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 20 марта 2018 г. В окончательной редакции 2 июня 2018 г.)

Предложен метод создания градиента давления посредством импульсного напуска воздуха в большую вакуумную камеру с целью лабораторного моделирования плазменных явлений в неоднородной по высоте атмосфере. Исследована динамика воздушного потока в дозвуковом и околозвуковом режимах течения при различных фоновых давлениях в камере. Показана возможность создания и регистрации мгновенных перепадов давления более двух порядков величины на масштабе около одного метра. Обсуждены особенности работы ионизационного манометра ПМИ-10-2, используемого для измерений давления, в импульсном газовом потоке.

DOI: 10.21883/JTF.2019.01.46959.117-18

Введение

Для экспериментального моделирования крупномасштабных плазменных явлений в атмосферах планет и звезд актуальной задачей является создание протяженных градиентов давления газа со значительными перепадами абсолютной величины в лабораторных условиях. Хотя полное количественное моделирование, основанное на параметрах подобия, едва ли возможно, отдельные качественные свойства и структурные особенности таких явлений, как, например, высотные электрические разряды [1] или высотные взрывы [2], могут быть воспроизведены в лабораторных установках.

При удобных для электрического пробоя давлениях ниже 10 Торг и умеренных скоростях вакуумной откачки неоднородное распределение газа может быть создано посредством его импульсного напуска в достаточно большую камеру. Имеющийся по данной тематике экспериментальный материал [3–5] относится преимущественно к сверхзвуковым режимам истечения, которые сопровождаются возбуждением ударных волн и вихрей, нежелательных при лабораторном моделировании эффектов в квазистационарной атмосфере. Напротив, для моделирования крупномасштабных атмосферных эффектов необходимо обеспечить минимальную скорость потока при максимально возможном перепаде давления на длине установки. Такой режим можно реализовать за счет увеличения размеров камеры и подбора давления фонового газа, тормозящего поток.

Работа в режиме импульсного напуска предполагает использование надежных методик измерения и контроля параметров нестационарных газовых струй в диапазоне форвакуума, что остается актуальной проблемой. В упомянутых выше работах [3–5] использовался ме-

тод зондирования газовой струи электронным пучком, который достаточно надежен, но требует использования нестандартной высоковольтной аппаратуры. Наибольшее распространение получили ионизационные манометры, с 1950-х годов [6] применяемые для регистрации импульсных молекулярных пучков [7–10] и решения задач управляемого термоядерного синтеза [11]. Малые длительности газовых импульсов и их фронтов (10–100 μ s), характерные для таких приложений, заставляют экспериментаторов разрабатывать собственные датчики либо существенно дорабатывать имеющиеся. Моделирование атмосферных плазменных процессов не требует столь высокого временного разрешения по давлению, однако предполагает проведение многократных, уверенно воспроизводимых измерений в обширной области пространства и в широком динамическом диапазоне. Кроме того, если моделируются эффекты в атмосфере Земли, то использование воздуха в качестве рабочего газа сопряжено с дополнительными требованиями к выбору материала термокатода [12].

В настоящей работе представлены результаты исследований динамики газа в камере лабораторного стенда, созданного для моделирования плазменных явлений в неоднородной по высоте атмосфере. Для измерений и контроля давления газа используются стандартные ионизационные манометры ПМИ-10-2 с иридиевым воздушостойким катодом. С их помощью восстановлены профили давления газа при напуске в камеру с различными уровнями разрежения, включая дозвуковой и околозвуковой режимы истечения. Показана возможность создания и измерения мгновенных перепадов давления более двух порядков величины на метровом промежутке. Обсуждаются некоторые особенности работы ионизационного манометра данного типа в набегающем потоке.

Описание эксперимента

Установка представляет собой металлическую вакуумную камеру длиной 2 м и диаметром 1.6 м, оснащенную системой форвакуумной и высоковакуумной откачки, которая включает пластинчатороторные насосы НВР-90Д, 2НВР-5ДМ и диффузионный паромасляный насос НВДМ-400 (рис. 1, *a*). Предельный вакуум в камере составляет 10^{-5} Торг. Импульсный напуск газа — воздуха при атмосферном давлении — осуществляется вдоль оси камеры с помощью электромагнитного клапана марки КВУМ-16 через патрубок диаметром 1.5 см и длиной 10 см, размещенный на торцевой стенке. Описанные в работе эксперименты выполнялись как при свободном расширении газа в камеру из патрубка, так и при напуске через установленную на оси камеры пластиковую трубу диаметром 110 мм и длиной 800 мм. Длительность импульса тока в обмотке клапана составляет от 7.5 до 30 мс. С целью повышения скорости открывания клапана и формирования резкого фронта давления к обмотке дополнительно прикладывается импульс повышенного напряжения, возбуждающий импульсный ударный ток амплитудой 30 А и длительностью около 1 мс. Время закрывания клапана, составляющее около 100 мс, определяется жесткостью возвратной пружины механического привода.

Подробное описание разрядной системы установки дано в работе [12]. Electroды для зажигания разряда находятся в расширяющемся газовом потоке, один из них — стержень из нержавеющей стали диаметром 1.2 см, второй — дюралевый диск диаметром 40 см, установленный перпендикулярно оси камеры. Импульс высокого напряжения от конденсаторной батареи емкостью 1.2 мкФ, заряжаемой до 3–6 кВ, прикладывается к разрядному промежутку через тиратронный ключ, при этом разрядный ток достигает 1.5 кА. Синхронизация эксперимента осуществляется изменением задержки импульса на открывание тиратронного ключа относительно момента открывания газового клапана. Длительность разряда не превышает 30–40 мкс, что существенно меньше характерного времени перераспределения газа, составляющего не менее нескольких сотен микросекунд. Таким образом, разряд развивается при практически неизменном профиле давления, „подсвечивая“ расширяющийся в камеру газ в выбранный момент времени. Для изучения разряда используются стандартные средства электрофизических измерений, включая зонды и СВЧ-интерферометр на частоте 27.5 ГГц; параллельно осуществляется фотосъемка, в том числе — скоростной камерой. На рис. 1, *b* приведена типичная интегральная фотография разряда в неоднородном газе, представляющего собой волокнистые стримерные структуры в области высокого давления, переходящие в диффузное свечение в области разрежения.

Ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-10-2 с иридиевым воздухостойким катодом предназначен для измерения в непрерывном режиме давле-

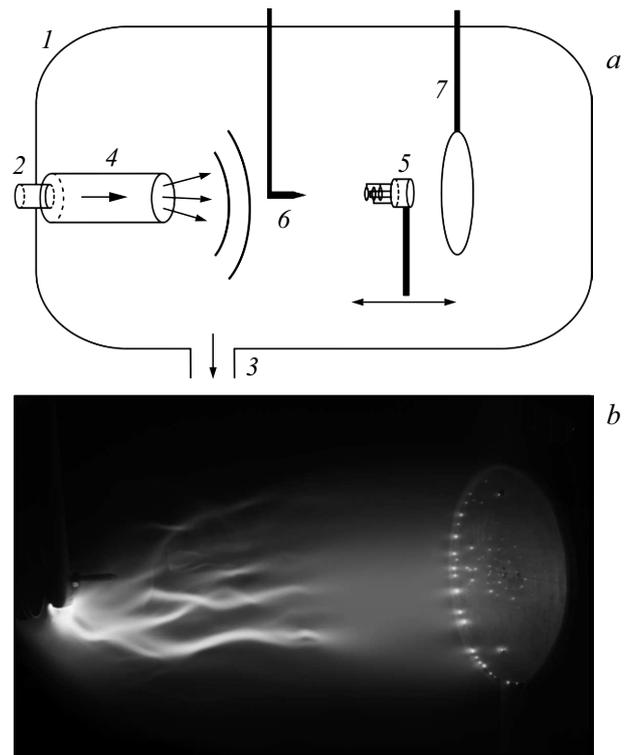


Рис. 1. *a* — схема экспериментальной установки и характерная фотография разряда в неоднородном газе: 1 — вакуумная камера, 2 — патрубок для импульсного напуска газа, 3 — система вакуумной откачки, 4 — труба, 5 — ионизационный манометр ПМИ-10-2, 6 — штыревой электрод высоковольтного разряда, 7 — дисковый электрод высоковольтного разряда; *b* — фотография разряда в неоднородном газе.

ний в диапазоне от 10^{-5} до 1 Торг; он адаптируется для измерения коротких газовых импульсов укорочением корпуса, при этом авторами работы [10] указывается временное разрешение порядка 10 мкс. В литературе описаны различные варианты модификации манометра и измерительной цепи [13], вплоть до полной замены оригинальной электродной системы [11], которые позволяют расширить диапазон измеряемых давлений и улучшить пространственно-временное разрешение измерительной системы. Без существенных изменений конструкции манометра для регистрации ионного тока на коллекторе и соответственно давления воздуха может быть использован штатный вакуумметр марки ВИТ-3. Вообще говоря, выбор конструкции большинства ионизационных манометров, представленных на современном рынке, продиктован их использованием в технологических процессах, что подразумевает автоматизацию измерений и формирование датчиками цифровых сигналов в собственном формате производителя. В результате временное разрешение большинства приборов оказывается не лучше десятков миллисекунд. Исполнение приборов, в свою очередь, затрудняет внесение изменений в конструкцию, а также их использование

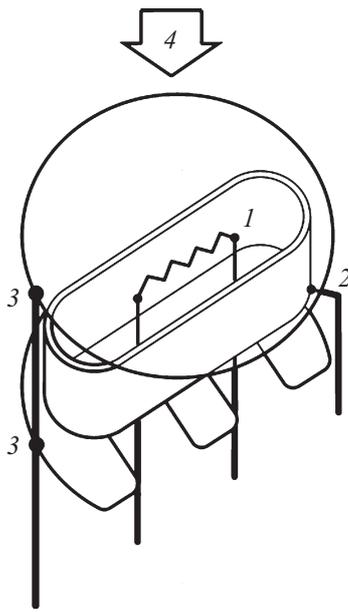


Рис. 2. Схематическое изображение электродной системы манометра ПМИ-10-2 в воздушном потоке: 1 — катод, 2 — анод, 3 — коллекторные пластины, 4 — направление газового потока.

для локальных измерений внутри вакуумной камеры. Таким образом, малогабаритный (длина 60 мм, диаметр 20 мм) отечественный ионизационный преобразователь ПМИ-10-2 на сегодняшний день оказывается наиболее простым и доступным средством регистрации коротких газовых импульсов.

При проведении экспериментов использовались манометры в штатном, либо в укороченном корпусе. В большинстве экспериментов, описанных в литературе, пластины анода и коллектора ионизационных манометров размещаются параллельно измеряемому газовому потоку, а находящийся между ними термокатод, нагретый до высокой температуры, полностью погружен в набегающий поток [11]. Такая геометрия обусловлена потребностью в высоком пространственном разрешении поперек потоков с апертурой около 1 см, необходимостью сведения к минимуму возмущений газового потока датчиком, а также стремлением к достижению наилучшего временного разрешения за счет прохождения потока непосредственно между анодной и коллекторной пластинами. При этом, однако, ток эмиссии катода снижается за счет его эффективного охлаждения в газовом потоке, что приводит к „завалу“ коллекторного тока в плотных, либо достаточно длинных газовых импульсах [10,11]. Поскольку в наших экспериментах ширина газовой струи в зоне измерений составляет 20 см и более, а требования к временному разрешению на порядок мягче, чем у авторов цитируемых работ, датчик ПМИ-10-2 в исходном и модифицированном вариантах всегда устанавливался соосно потоку, т.е. внешняя пластина коллектора была перпендикулярна вектору скорости газа (рис. 2). В такой

конфигурации электродная система манометра возмущает поток в поперечном сечении площадью 3–5 см², а в межэлектродное пространство манометра (где происходит ионизация) газ поступает через боковые зазоры между коллекторными пластинами и анодом. Последнее обстоятельство является основной причиной снижения временного разрешения измерительной системы. В то же время, в данной конфигурации термокатод экранируется от прямого потока коллекторными пластинами и анодным кольцом, и эффекты охлаждения — а значит и потери эмиссии катода — менее существенны, чем в работах [10,11].

Статическая калибровка измерительной цепи производилась широкодиапазонным датчиком вакуума Pfeiffer PKR251 с активным блоком управления RVC300, ее результаты представлены на рис. 3. Отклик измерительной цепи по статическому давлению оказывается линейным в диапазоне выходных напряжений ВИТ-3 от 0.1 до 1 В. При давлениях газа выше 1 Торг цепи ВИТ-3 быстро переключаются в режим защиты (ограничения), и статическая калибровка невозможна. Однако динамическая калибровка, производимая путем напуска фиксированной порции воздуха при различных фоновых давлениях, показывает, что бросок напряжения пропорционален расчетной амплитуде импульса давления вплоть до 1.5–2 Торг, что позволяет определить указанные значения как верхний предел динамического диапазона измерений.

Следует помнить о том, что коллекторный ток ионизационных манометров пропорционален, строго говоря, не давлению, а концентрации молекул нейтрального газа. Поэтому при использовании манометра в нестационарном газовом потоке возникает систематическая ошибка, обусловленная тем, что температура газа, нагретого катодом в зоне измерений, оказывается ниже, чем при статической калибровке. Согласно [11], величина давления за счет данной ошибки может систематически

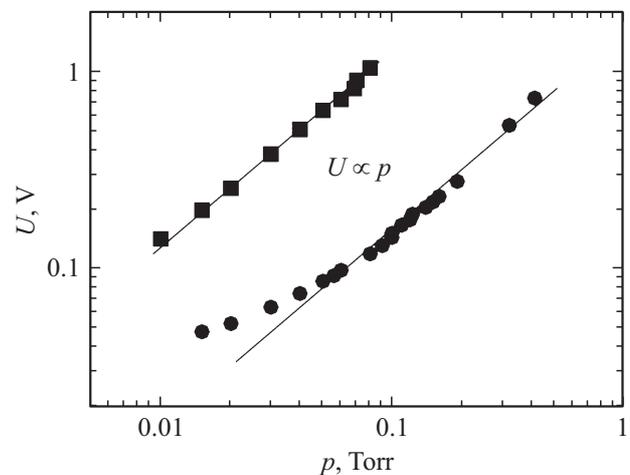


Рис. 3. Напряжение на выходе преобразователя ВИТ-3 с манометром ПМИ-10-2 в зависимости от статического давления воздуха для двух шкал (коэффициентов усиления).

завышаться до двух раз. Тем не менее из соображений удобства все результаты измерений ПМИ-10-2 в настоящей работе приводятся в единицах давления.

При проведении измерений датчик перемещался вдоль геометрической оси камеры с шагом 7–10 см с помощью электромеханического привода, установленного в вакууме. При напуске газа сигнал с датчика усиливался в цепи вакуумметра ВИТ-3, и с его аналогового выхода подавался на вход цифрового осциллографа. Для контроля повторяемости параметров газового потока от одного цикла напуска к другому в каждом положении датчика фиксировалось по две–три реализации. Если перепад давления за цикл впрыска воздуха составлял более одного порядка величины, то запись сигналов производилась при нескольких значениях коэффициента усиления (на различных шкалах) ВИТ-3 с последующей сшивкой временных рядов и компенсацией уровней нуля. С имеющейся системой вакуумной откачки выход камеры на фоновое давление 10^{-2} Торр после каждого цикла инъекции воздуха занимал 15–20 min, на давление 10^{-4} Торр — 40 min. В итоге при фиксированной позиции манометра проведение всего цикла необходимых измерений занимало не менее 1.5 h — восстановление профиля давления в камере в динамике оказывается весьма трудоемкой задачей.

Экспериментальные результаты

Скачок давления, возникающий при импульсном напуске, зависит от давления фонового газа в камере и порции напускаемого воздуха, которая, в свою очередь, определяется длительностью импульса тока в обмотке клапана. Для анализа были выбраны только те режимы, в которых амплитуда скачка давления в зоне измерений не превышала 1.5 Торр, что соответствовало верхней границе динамического диапазона манометрической системы. Время прохождения первичного газового фронта от впускного патрубка до противоположного торца камеры составляет до 10 ms от момента выхода газа в рабочий объем. После прохождения первичного фронта динамика давления оказывается достаточно сложной из-за отражений воздушной струи от стенок камеры. Полное время установления равновесного распределения давления газа в камере определяется временем закрывания клапана и составляет около 100 ms. В зависимости от настройки клапана приращение давления в камере за один рабочий цикл составляет $\Delta p = 0.15\text{--}0.25$ Торр, что соответствует впрыску $N = (2\text{--}3) \cdot 10^{22}$ молекул при комнатной температуре.

На рис. 4 представлены результаты измерений динамики давления в различных точках вдоль оси камеры при свободном расширении струи от впускного патрубка в фоновый воздух при давлении 0.2 Торр. Здесь и далее время t отсчитывается от момента подачи управляющего импульса на газовый клапан, при этом задержка прихода импульса давления в позицию манометра определяется как временем прохождения газового фронта от точки

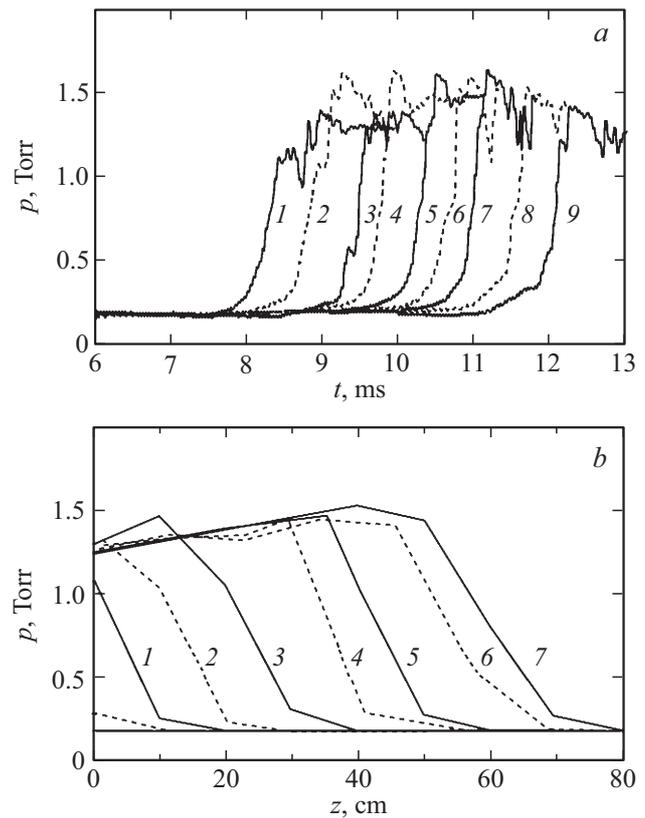


Рис. 4. *a* — зависимость давления газа от времени на различных расстояниях вдоль оси камеры: 1 — 0, 2 — 9, 3 — 18, 4 — 27, 5 — 36, 6 — 45, 7 — 54, 8 — 63, 9 — 72 см (за 0 принята точка установки штыверного электрода); *b* — моментальные распределения давления в различные моменты времени после подачи управляющего импульса на газовый клапан при напуске воздуха в камеру с фоновым давлением $p_0 = 2 \cdot 10^{-1}$ Торр: 1 — 5, 2 — 5.5, 3 — 6, 4 — 6.5, 5 — 7, 6 — 7.5, 7 — 8 ms. Измерения выполнены ПМИ-10-2 в штатном корпусе.

напуска, так и инерцией в работе электромеханической системы клапана. Согласно рис. 4, вдоль оси камеры движется фронт давления практически постоянной амплитуды. Скорость движения фронта близка к половине скорости звука; пространственная длина фронта составляет около 20 см. В зависимостях давления от времени можно выделить некоторые динамические особенности. Во-первых, по мере удаления датчика от точки напуска газа на временной зависимости давления появляется характерный начальный подъем, или „пьедестал“, предшествующий основному газовому фронту. Во-вторых, после прихода основной порции воздуха наблюдаются интенсивные пульсации коллекторного тока манометра. Контрольные измерения показывают, что эти пульсации не являются паразитными колебаниями в измерительной радиотехнической схеме; они обусловлены переходной динамикой газа в измерительной части ионизационного датчика по мере установления равновесного распределения.

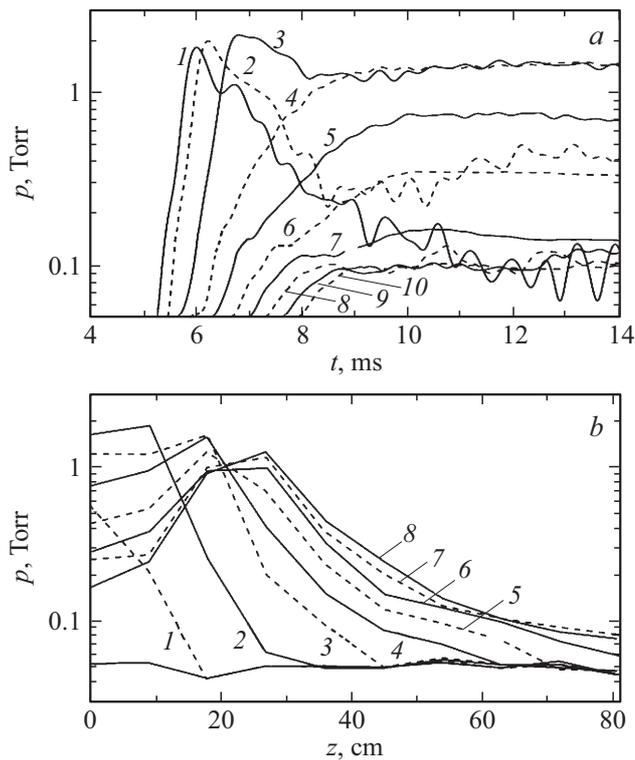


Рис. 5. *a* — зависимость давления газа от времени на различных расстояниях от среза трубы: 1 — 0, 2 — 9, 3 — 18, 4 — 27, 5 — 36, 6 — 45, 7 — 54, 8 — 63, 9 — 72, 10 — 81 см; *b* — моментальные распределения давления в различные моменты времени после подачи управляющего импульса на газовый клапан при напуске воздуха в камеру с фоновым давлением $p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ Торр: 1 — 5, 2 — 5.5, 3 — 6, 4 — 6.5, 5 — 7, 6 — 7.5, 7 — 8, 8 — 8.5 ms. Измерения выполнены ПМИ-10-2 в штатном корпусе.

При понижении фонового давления до величин порядка 10^{-2} Торр и доставке газа в зону измерений через трубу, соосную камере, удается получить более высокие мгновенные перепады давления воздуха на длине установки. На рис. 5 и 6 представлены результаты измерений, выполненных при напуске газа через трубу, для значений фонового давления $p_0 = 5 \cdot 10^{-2}$ Торр и $p_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ Торр соответственно. Данные при более высоком давлении фона были получены манометром ПМИ-10-2 в штатном корпусе, при низком давлении — манометром в укороченном корпусе. Поскольку перепад давлений в струе достигает двух порядков величины, результаты приводятся в полулогарифмическом масштабе. При $p_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ Торр в момент времени около 6.5 ms после подачи напряжения на обмотку клапана наблюдается перепад давления в 150 раз на длине установки.

Обратим внимание на некоторые качественные отличия сигналов, получаемых манометрами в штатном и в укороченном корпусах. Во-первых, при проведении измерений манометром в штатном корпусе около среза трубы, где плотность и давление воздуха максимальны, видны интенсивные осцилляции сигнала (см. рис. 5);

в сигнале манометра в укороченном корпусе такие колебания отсутствуют (см. рис. 6). Во-вторых, после укорочения корпуса манометра электроды измерительной части оказываются открытыми для газовых потоков, поступающих со всех направлений. Поэтому на расстоянии 30–80 см от среза трубы на временах 10–12 ms манометром уверенно регистрируется вторичный газовый фронт, отраженный от торцевой крышки камеры. На пространственно-временной диаграмме, представленной на рис. 7, этот фронт визуализирован через производные давления по времени, полученные на различных расстояниях от среза трубы. Выделить вторичный газовый фронт в сигнале манометра в штатном корпусе (см. рис. 5) не удастся.

Обработка последовательности осциллограмм коллекторного тока, полученных на различных расстояниях от точки выхода газа в камеру, позволяет восстановить скорость движения газового фронта вдоль оси установки. На рис. 8 сведены результаты измерений скорости газового фронта в зависимости от значения фонового давления в камере. Ошибка определения скорости связана с разницей задержек прихода газового фронта к манометру

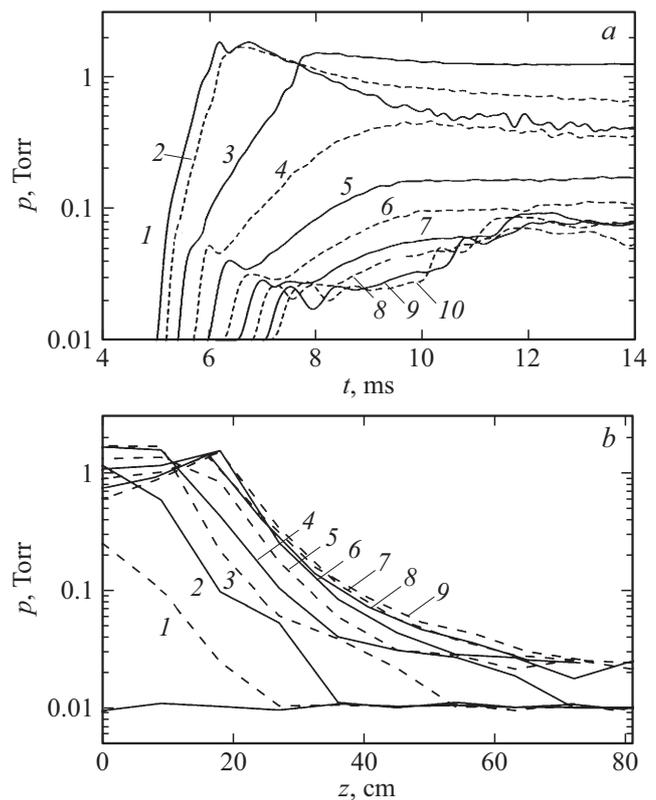


Рис. 6. *a* — зависимость давления газа от времени на различных расстояниях от среза трубы: 1 — 0, 2 — 9, 3 — 18, 4 — 27, 5 — 36, 6 — 45, 7 — 54, 8 — 63, 9 — 72, 10 — 81 см; *b* — моментальные распределения давления в различные моменты времени после подачи управляющего импульса на газовый клапан при напуске воздуха в камеру с фоновым давлением $p_0 = 1 \cdot 10^{-2}$ Торр: 1 — 5, 2 — 5.5, 3 — 6, 4 — 6.5, 5 — 7, 6 — 7.5, 7 — 8, 8 — 8.5, 9 — 9 ms. Измерения выполнены ПМИ-10-2 в укороченном корпусе.

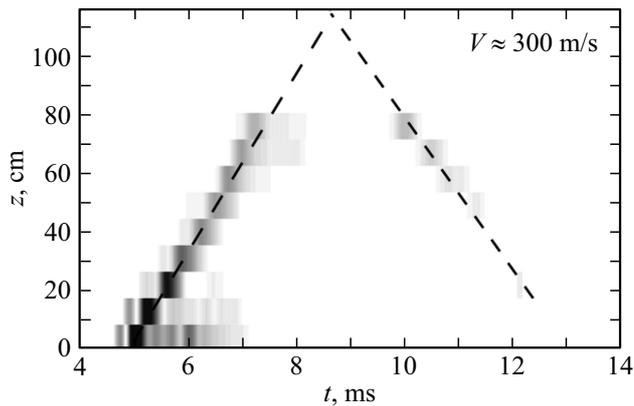


Рис. 7. Пространственно-временная диаграмма, построенная по данным рис. 6 для демонстрации вторичного газового фронта, отраженного от противоположного торца камеры. В градациях серого представлена переменная составляющая давления.

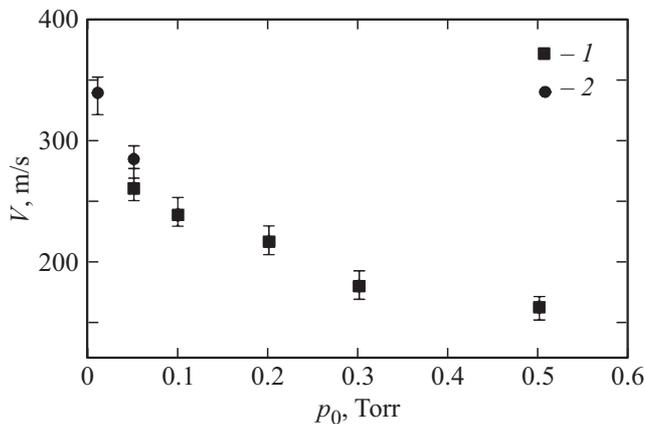


Рис. 8. Скорость расширения газа в камеру в зависимости от фонового давления: 1 — без трубы, 2 — через трубу.

для двух методов оценки — по основанию „пьедестала“ либо по заданному значению на фронте нарастания коллекторного тока. Скорость потока возрастает с понижением давления фона; при $p_0 \sim 10^{-2}$ Torr истечение газа становится околосвуковым, если считать скорость звука как при нормальных условиях ($V_0 = 330$ m/s).

Обсуждение

Выполненные исследования указывают на то, что скоростью выпускаемого газа, величиной абсолютного перепада давления и профилем давления на длине установки можно управлять за счет эффектов торможения потока в фоновом газе. В частности, при высоком давлении фона газ движется с низкой скоростью, однако относительный перепад давления в потоке невелик, а фронт имеет малую пространственную длину. С другой стороны, при сильном разрежении в камере можно существенно увеличить относительный перепад и создать протяжен-

ный — порядка метра — монотонный профиль давления. Однако режим течения газа в этом случае приближается к сверхзвуковому, что нежелательно. Для адекватного моделирования крупномасштабных плазменных явлений в неоднородной по высоте атмосфере может быть подобран промежуточный режим по фоновому давлению. Такой компромисс был найден, например, для получения результатов, представленных в недавней работе [12].

Остановимся на некоторых особенностях измерений, обусловленных конструкцией манометра ПМИ-10-2, и на возможных искажениях результатов измерений. О систематическом завышении давления, связанном с охлаждением газа в измерительном пространстве манометра, уже упоминалось выше. С другой стороны, согласно [10,11], остывание катода в набегающем газе влечет за собой снижение его эмиссионной способности. Недостаток эмитируемых электронов приводит к проседанию коллекторного тока и соответственно к занижению давления к концу достаточно длинных газовых импульсов. В описываемом эксперименте роль эффектов охлаждения катода можно оценить, сопоставив результаты измерений, выполненных манометром в штатном и в укороченном корпусах. Сравнение рис. 5 с рис. 6 показывает, что в плотном газовом потоке на срезе трубы у манометра в штатном корпусе коллекторный ток (или давление — согласно статической калибровке) существенно проседает по сравнению с датчиком в укороченном корпусе. Действительно, в первом случае манометр перехватывает часть набегающего потока, который входит в зазор между внешней коллекторной пластиной и корпусом, задерживается в измерительной части и, прежде чем выйти из манометра, успевает снять с катода значительное тепло. Если корпус манометра укорочен, то поток не перехватывается, газ обтекает коллектор и анод манометра. Поступление газа в измерительную часть происходит через узкие зазоры между анодом и коллекторными пластинами со скоростью, заметно меньшей направленной скорости потока. Таким

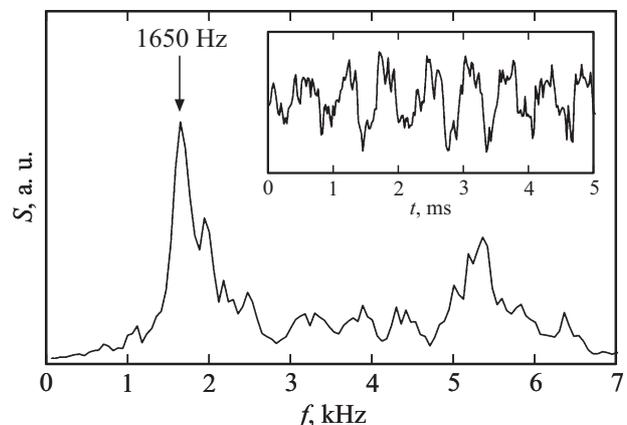


Рис. 9. Волновая форма (врезка) и частотный спектр акустических колебаний манометра ПМИ-10-2 в штатном корпусе, возбуждаемых в воздушном потоке при атмосферном давлении.

образом, эффект проседания коллекторного тока если и проявляется, то в меньшей степени, чем для манометра в штатном корпусе (см. рис. 6, кривые 1–4).

Анализ показывает, что квазипериодические пульсации коллекторного тока датчика в штатном корпусе, показанные на рис. 5, обусловлены собственными акустическими колебаниями в полости манометра, возбуждаемыми плотным газовым потоком вблизи среза трубы. На рис. 9 показан акустический отклик („свист“) манометра ПМИ-10-2 в штатном корпусе, полученный при атмосферном давлении в газовом потоке, направленном на измерительную часть. Основным максимум спектра отклика, полученного с помощью микрофона, соответствует частоте пульсаций коллекторного тока на рис. 5, составляющей около 1600 Hz. Это значение близко к частоте четвертьволнового акустического резонанса трубки, открытой с одной стороны, и заглушенной с другой стороны, $f \sim V_0/4l = 1833$ Hz, где $l = 4.5$ cm — длина резонатора от открытого торца измерительной части до основания. У манометра в укороченном корпусе акустический резонатор отсутствует; пульсаций сигнала не наблюдается (см. рис. 6).

Заключение

Реализована система создания и измерения параметров импульсных газовых потоков с перепадами давления до нескольких порядков величины на длине около одного метра. Для измерения и контроля давления газа в таких потоках могут использоваться стандартные манометры типа ПМИ-10-2 как в штатном исполнении, так и в модификации с укороченным корпусом. Установлены дополнительные преимущества такой модификации, включая (1) устранение пульсаций давления, связанных с акустическим резонансом корпуса манометра, и (2) снижение влияния эффектов охлаждения катода и уменьшения его эмиссионной способности на результаты измерений посредством установки манометра соосно газовому потоку. В широком диапазоне давлений фонового газа в камере реализуется дозвуковой режим течения, в котором возможно ограниченное моделирование плазменных эффектов в неоднородной по высоте атмосфере. Отметим также, что описанные исследования проведены в вакуумной камере, имеющей вполне типичные размеры, с использованием доступного оборудования. Поэтому полученные результаты по динамике давления при импульсном напуске газа в диапазоне форвакуума представляют методический интерес, и, на наш взгляд, могут быть полезны широкому кругу специалистов в области вакуумной техники, механики газа и физики плазмы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИПФ РАН (проект № 0035-2018-0021) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор № 14.Z50.31.0007) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-05-01182-а).

Список литературы

- [1] Pasko V.P. // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. N 6. P. A00E3.
- [2] Rabinowitz M., Meliopoulos A.P., Glysis E., Cokkinides J.G. // Int. J. Modern Phys. B. 1992. Vol. 6. N 20. P. 3353–3380.
- [3] Еремин А.В., Кочнев В.А., Набоко И.М. // ПМТФ. 1975. № 2. С. 53–58.
- [4] Еремин А.В., Кочнев В.А., Куликовский А.А., Набоко И.М. // ПМТФ. 1978. № 1. С. 34–40.
- [5] Кочнев В.А., Набоко И.М. // ПМТФ. 1980. № 2. С. 107–113.
- [6] Schulz G.J., Phelps A.V. // Rev. Sci. Instrum. 1957. Vol. 28. N 12. P. 1051.
- [7] Gentry W.R., Giese C.F. // Rev. Sci. Instrum. 1978. Vol. 49. N 5. P. 595.
- [8] Keyser C.J., Dembinski M., John P.K. // Rev. Sci. Instrum. 1980. Vol. 51. N 4. P. 425.
- [9] Proch D., Trickl T. // Rev. Sci. Instrum. 1989. Vol. 60. N 4. P. 713.
- [10] Батулин В.А., Карпенко А.Ю., Колинько С.В. // Вісник Сумського державного університету. Сер. Фізика, математика, механіка. 2004. Т. 67. № 8. С. 138.
- [11] Кузнецов О.С., Репин П.Б., Савченко Р.В., Селявский В.Т. // ПТЭ. 2001. № 2. С. 140.
- [12] Стриковский А.В., Евтушенко А.А., Гуцин М.Е., Коробков С.В., Костров А.В. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 10. С. 866.
- [13] Барашкин С.Т., Сыромятников С.Н., Тютюник О.И., Породнов Б.Т., Кошелев Ю.М. // ПТЭ. 1989. № 3. С. 137.