

УДК 533.599+533.6.011.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ В РАЗРЕЖЕННУЮ СРЕДУ В ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

© 2024 г. А. Е. Зарвин^{а, б}, В. В. Каляда^б, А. С. Яскин^{б, *}, К. А. Дубровин^{а, б},
Е. Д. Деринг^{а, б}, В. Э. Художитков^{а, б}

^аИнститут теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

^бНовосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: yas@nsu.ru

Поступила в редакцию 13.12.2023 г.

После доработки 30.04.2024 г.

Принята к публикации 08.06.2024 г.

Проанализировано применение электромагнитных клапанов для генерации импульсных режимов истечения сверхзвуковой струи высокой плотности в секундном и субмиллисекундном диапазонах. Показано, что “медленные” клапаны секундного диапазона не позволяют достичь квазистационарного режима с высоким расходом газа по сравнению со стационарным истечением; “быстрые” клапаны субмиллисекундного диапазона генерируют газовые импульсы с параметрами, необходимыми для моделирования режимов с высоким расходом, при давлениях фонового газа, не перегружающих высоковакуумную откачную систему. Установлено, что субмиллисекундный клапан обеспечивает возможность моделирования в импульсе мгновенных расходов до нескольких десятков граммов продукта в секунду при давлениях в форкамере до 2 МПа и давлении в окружающем пространстве ниже нескольких Па. Реализован комплект звуковых и сверхзвуковых сопел с электромагнитным клапаным устройством, системами энергопитания и управления, обеспечивающими истечение газа из форкамеры сопла в течение регулируемого промежутка времени, от 0.3 до 1.5 мс, с заданной скважностью, варьируемой в пределах от нескольких десятков до тысяч. Сформированные газовые импульсы имеют трапецевидную форму с квазистационарным ядром.

DOI: 10.31857/S0032816224050235 EDN: EQXJTW

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении многих лет наблюдается интерес к плазмохимическим процессам, протекающим в реакторной зоне при давлениях ниже атмосферного. Однако определение состава производимых продуктов, степени конверсии используемого сырья и удельного энерговклада в исследуемые механизмы на стационарных лабораторных установках ограничено как по расходу рабочего газа, так и по предельной мощности разряда или активирующего пучка электронов [1–4].

Расход газа G прямо пропорционален произведению давления торможения P_0 на квадрат диаметра критического (звукового) сечения сопла d_* . При ограниченной мощности вакуумных откачных средств увеличение давления торможения требует уменьшения критического диаметра сопла. Поскольку уменьшение размеров сопел имеет свои технические пределы, а при миниатюризации сверхзвуковых сопел к тому же обостряются проблемы воспроизведения геометрии внутреннего канала, а также шероховатости поверхности, параметры режимов

стационарного истечения ограничены. Попытки увеличения расхода рабочих газов требуют непропорционально быстрого роста производительности откачных средств и, соответственно, стоимости выполняемых работ. Так, при стационарном истечении газа максимальная производительность системы вакуумирования газодинамического стенда ЛЭМПУС2 [5], используемого в настоящей работе, ограничивается условием его безопасного режима функционирования, который реализуется при давлении в камере расширения, не превышающем 20 Па. Этот предел проиллюстрирован на рис. 1 при истечении газа из звукового сопла диаметром 1.12 мм. При достижении давления торможения 40–50 кПа (в зависимости от вида газа) дальнейшее увеличение давления в форкамере ведет к стремительному росту фонового давления, не позволяя увеличивать расход.

Для утилизации продуктов плазмохимических реакций также необходимы высокие скорости компрессии, что затруднительно достичь в лабораторных условиях. Увеличение электрической мощности плазмообразующих устройств при ограниченной эффективности процесса утилизации тепловой энергии требует использования сложных теплообменников, также удорожающих эксперимент. Поэтому при моделировании технологических процессов наиболее удачной альтернативой представляется переход на импульсную технику формирования газовых потоков.

Какие технические требования предъявляются к клапанным системам? Импульсный клапан должен работать в вакууме, следовательно, он должен иметь герметичный корпус, низковольтную энергетику, соответствующие конструкционные материалы. Клапан должен быть быстродействующим, с минимальными временами фронта и спада. В то же время, клапан должен выдерживать большое количество тактов открытия / закрытия. Естественны также вопросы стоимости изделия, доступности для приобретения, гарантии производителя, ремонтпригодности.

Не менее важны и требования, предъявляемые к газодинамике процесса истечения из клапанной системы. Перечислим важнейшие:

- формирование расчетного истечения из форкамеры через сопло, чтобы измеряемое давление до выхода из сопла соответствовало давлению

торможения потока; для этого необходимо соединение корпуса клапана с форкамерой сопла требуемого объема;

- минимизация времени нарастания и спада интенсивности импульсного газового потока (фронт и спад газового импульса); идеальная форма импульса — трапеция, стремящаяся к прямоугольнику;

- обеспечение стабилизации фонового давления в камере расширения импульсного газового потока, для чего необходим подбор оптимального соотношения между временем истечения газа через сопло и временем паузы между периодами включения клапана, т.е. скважности режима работы клапана Q ;

- создание условий повторяемости и воспроизводимости истечения для накопления информации за серию циклов с целью выделения полезного сигнала из шума;

- в итоге — обеспечение возможности измерения параметров потока за время квазистационарного истечения рабочего газа или газовой смеси из сопла в вакуум (разреженное пространство).

В настоящей работе обобщен имеющийся опыт работы с импульсными клапанами, изложены проблемы при проведении экспериментов с ними и методы их решения, накопленные авторами при постановке исследовательских задач по моделированию большого расхода газовых потоков на комплексе экспериментальных стендов Новосибирского государственного университета.

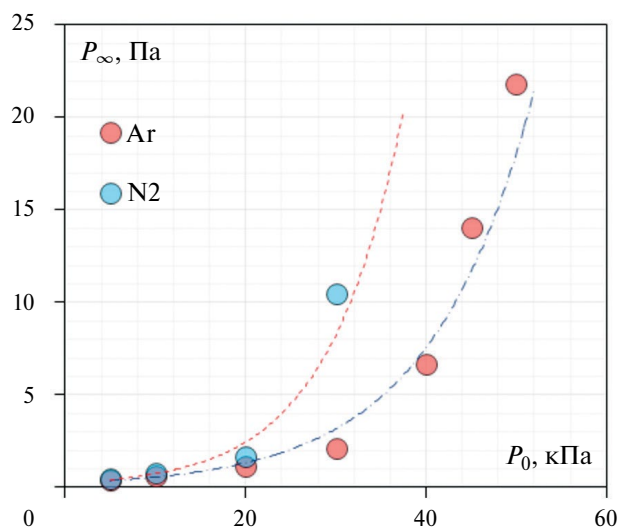


Рис. 1. Давление в камере расширения в зависимости от давления торможения при непрерывном истечении газа из звукового сопла, $d_* = 1.12$ мм.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Экспериментальные установки, на которых выполнялись работы в разные промежутки времени, описаны в работах [5–7]. Стенды оснащены полностью безмасляными форвакуумными откачными системами, турбомолекулярными и гелиевыми криогенными насосами, обеспечивающими суммарную скорость откачки до 8700 л/с (стенд ЛЭМПУС2 [5]) в диапазоне остаточного давления от 10^{-4} до 10^{-1} Па, электронно- и молекулярно-пучковым оборудованием, лазерной аппаратурой, квадрупольным и времяпролетным масс-спектрометрами и другими системами, обеспечивающими исследования в сверхзвуковых потоках разреженных газов и газовых смесей, что дает возможность анализа состава образующихся продуктов газозвучных химических реакций и малых кластеров. Комплекс регистрирующих систем и диагностических методик, адаптированный к импульсным режимам работы, обеспечивает возможность решения широкого круга задач химической физики. Для проведения модельных исследований использованы сопла различных диаметров критического сечения и конфигураций сверхзвуковых сопел.

При решении поставленной задачи перед экспериментатором возникает соблазн использовать промышленные газовые клапаны. В контексте настоящей работы был осуществлен поиск и анализ устройств, пригодных для работы в вакууме, из большого перечня, имеющегося в публикациях. Удовлетворяющими условиям

работы в вакууме и доступными для приобретения оказались промышленные клапаны “секундного” диапазона, из которых наиболее подходящим по характеристикам под задачи исследования подошел вакуумный клапан GEMS SENSORS & CONTROLS A2013 S197 VAC [8]: время срабатывания (быстродействие) – 9 мс, двухпозиционный, нормально закрытый, с низким потреблением (примерно 1.5 Вт, при напряжении питания 24 В), с проходным отверстием 1/6" (4.23 мм). Клапан предназначен для работы с нейтральными газами и жидкостями. Рабочее давление 0–20.68 бар (0–300 PSI). Клапан изготовлен из нержавеющей стали и рекомендован для работы в диапазоне рабочих температур 0–80°C. Фотография клапана приведена на рис. 2а.

Среди нестандартных разработок, используемых в исследованиях, для работы был выбран электромагнитный клапан, сконструированный в Институте ядерной физики СО РАН [9]. Поскольку целью авторов конструкции являлась импульсная система напуска газа в ускоритель, форма импульса (непринципиальный параметр для разработчиков клапана) была выбрана треугольной. Однако для использования в газодинамических исследованиях клапанный блок был модифицирован с целью создания квазистационарного режима истечения, моделирующего стационарные сверхзвуковые струи: форма импульса была сделана необходимой (трапецеидальной, с максимально широкой и стабильной верхней стороной трапеции и короткими передним и задним фронтами). Основное внимание было уделено быстрому

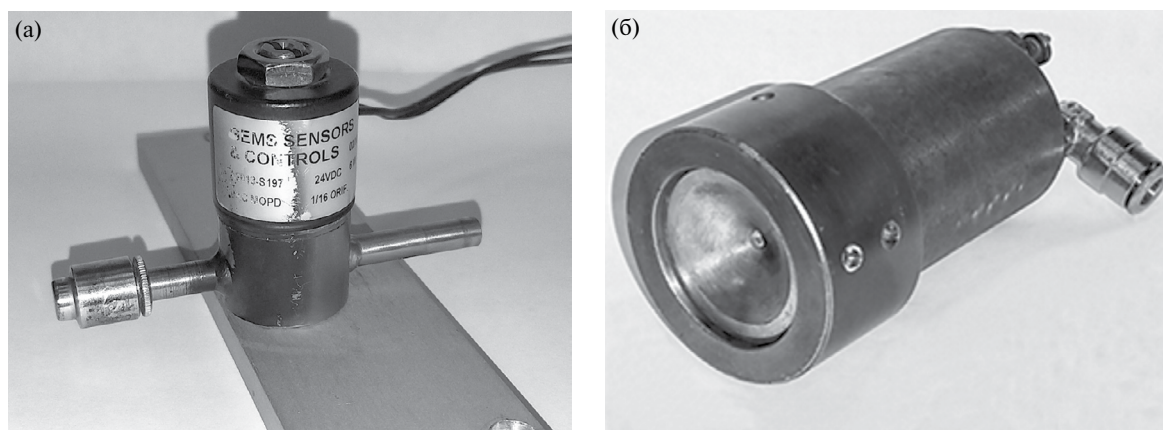


Рис. 2. Внешний вид импульсного клапана для газодинамического применения: а – секундный клапан A2013 S197 VAC в сборе с соплом, б – субмиллисекундный клапан в сборе.

наполнению балластного объема (форкамеры сопла) при открытии клапанного устройства для обеспечения условия покоящегося газа в этом объеме и одновременно коротких фронтов импульса. Поэтому технические ограничения не позволили использовать сопла с критическим сечением более 1 мм в диаметре. Клапан подобной конструкции уже использовался в НГУ ранее на экспериментальном стенде первого поколения [10]. В настоящей работе была использована современная элементная база питания клапанного устройства и регистрации параметров импульсов. Внешний вид субмиллисекундного клапана приведен на рис. 26.

Для моделирования режимов импульсного истечения из сопел газов и газовых смесей в вакуум (сильно разреженное пространство) на стенде ЛЭМПУС2 был собран дополнительный модуль. Модуль оснащен устройством контроля расхода газа РРГ12 производства ЭЛТОЧПРИБОР с погрешностью не более $\pm 1.1\%$, датчиком давления в камере торможения Siemens SITRANS P Series Z с погрешностью 0.5%, ресивером объемом 2 л и сменными импульсными клапанами. В модуль, кроме этого, входят набор звуковых и сверхзвуковых сопел для создания разреженных сверхзвуковых импульсных струй, а также системы питания импульсных клапанов. На модуле реализованы два альтернативных режима импульсного истечения струй – с короткими, менее 1 мс, и длинными, свыше 1 с, импульсами истечения при подаче на управляющие электромагнитные клапаны соответствующих прямоугольных электрических импульсов от систем питания, управляемых задающими генераторами. Подготовлены также системы диагностики импульсных газовых струй.

Системы регистрации плотности газовой струи, истекающей из сопла клапанного устройства, основаны на электронно-пучковой диагностике [11–13]. При прохождении электронного луча через струю разреженного газа частицы газа возбуждаются. Возвращение частиц в невозбужденное состояние сопровождается люминесценцией. Картина истечения, заснятая с помощью камеры Nikon D7200, приведена на рис. 3 при расположении электронного пучка относительно газового источника с клапаном на расстоянии порядка 20 мм.

Для детектирования свечения при работе с секундным клапаном использовался

спектрометр Ocean Optics USB4000, настроенный на регистрацию временной зависимости интенсивности монохроматического излучения аргона на длине волны 750.4 нм. Полученные сигналы передавались на персональный компьютер. Для детектирования интегрального свечения частиц газа при работе с быстрым клапаном использовался ФЭУ92, амплитуда фототока которого после преобразования с помощью АЦП “R-Technology” USB3000 регистрировалась в виде временной зависимости. Временное разрешение изменения интенсивности люминесценции при регистрации фототока ФЭУ составляло 2 мкс. Принципиальная схема системы диагностики приведена на рис. 4.

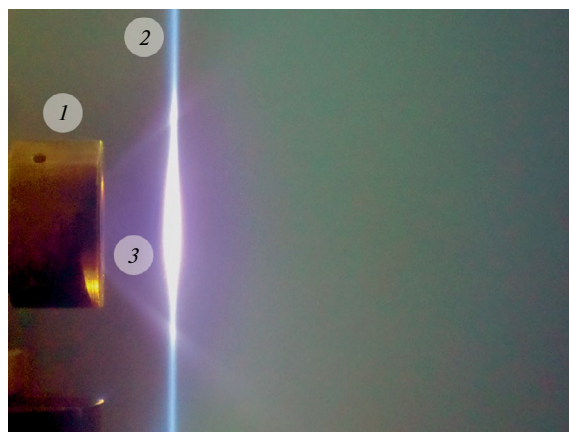


Рис. 3. Электронно-пучковая визуализация импульсной струи аргона при $P_0 = 400$ кПа, $\langle P_\infty \rangle = 0.19$ Па, $X_0 = 20$ мм и длительности импульса 0.5 мс: 1 – форкамера сопла с импульсным субмиллисекундным клапаном; 2 – электронный пучок; 3 – расширяющийся поток газа.

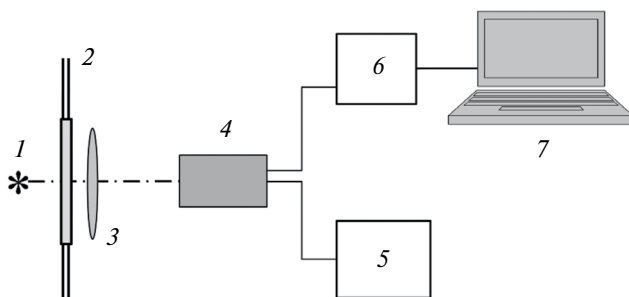


Рис. 4. Оптическая схема регистрации импульсов люминесценции струи газа: 1 – инициированное свечение частиц газа, 2 – окно камеры расширения, 3 – линза, 4 – ФЭУ-92 (или спектрометр Ocean Optics USB4000), 5 – блок питания ФЭУ, 6 – АЦП USB3000, 7 – компьютер.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ: РЕАЛИЗАЦИЯ ИСТЕЧЕНИЯ В СИЛЬНО РАЗРЕЖЕННУЮ СРЕДУ ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ГАЗА

Перед началом работы клапанного устройства, т.е. истечением газа из форкамеры через сопло в камеру расширения, фоновое давление в ней не превышает 0.001 Па благодаря откачной способности высоковакуумных турбомолекулярных насосов. Под условиями работы в режимах импульсного истечения из сопла в вакуум или сильно разреженное пространство подразумевается установившееся вследствие работы клапанного устройства фоновое давление в камере расширения на уровне менее 10 Па и даже, как правило, менее 1 Па. Таким образом, исходное давление фонового газа (в составе которого, известном благодаря масс-спектрометрии, присутствуют пары воды, азот, кислород, следы легких углеводородов и другие элементы) всегда намного меньше установившегося при работе клапанной системы давления. Соответственно, при работе клапанного устройства остаточная атмосфера состоит практически полностью из газа, истекающего из форкамеры сопла через клапан. Поэтому вкладом в состав фонового газа при работе клапанного устройства иных

газов, кроме рабочего, истекающего через сопло и клапанную систему, можно пренебречь.

3.1. Импульсный клапан секундного диапазона

Возможность использования “медленного” клапана для получения газовых импульсов высокой плотности потока анализировалась при истечении газа из звуковых сопел диаметрами 0.3 и 0.7 мм. Испытания проведены на стенде ЛЭМПУС2 в диапазоне давлений P_0 до 400 кПа при комнатной температуре. Камера расширения откачивалась турбомолекулярными насосами до остаточного давления $P_\infty < 0.13$ Па. Криогенные насосы в испытаниях не использовались. Параметры импульса: время фронта t_f и спада t_c импульса, длительности плоской части импульса $t_{пл}$ определялись в соответствии с ГОСТ 16465 [14]. Длительность импульса $t_{и}$ определялась на его полувывсоте. Измерения формы газового импульса проводились на расстоянии 40 мм от среза сопла (расстояние сопло – электронный пучок).

На рис. 5 приведены результаты детектирования импульсных струй, формируемых

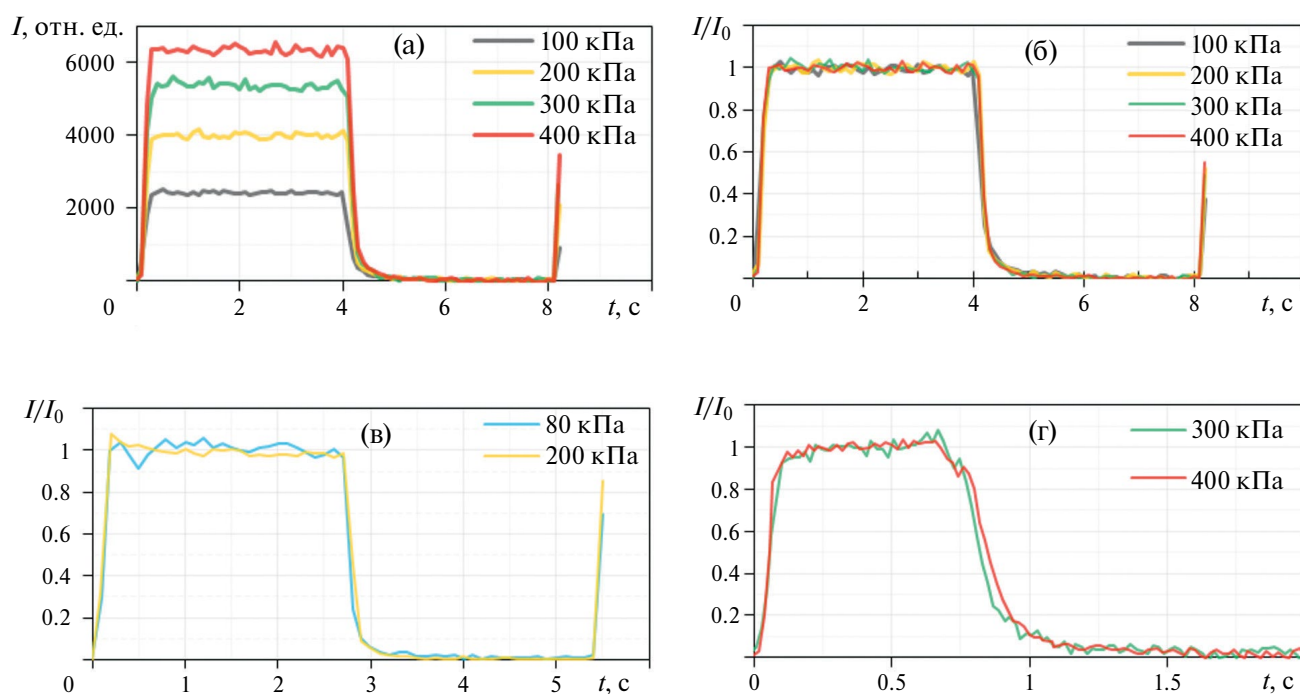


Рис. 5. Профили интенсивности излучения, зарегистрированные в импульсном истечении аргона при различных значениях P_0 : а – без нормировки, $t_{и} = 4$ с; б, в, г – с нормировкой к единице в максимуме: б – $d^* = 0.3$ мм, $0.13 \text{ Па} < P_\infty < 1.1 \text{ Па}$, $t_{и} = 4$ с, $Q = 2$; в – $d^* = 0.7$ мм, $0.1 \text{ Па} < P_\infty < 2.1 \text{ Па}$, $t_{и} = 2.7$ с, $Q = 2$; г – $d^* = 0.3$ мм, $0.13 \text{ Па} < P_\infty < 1.1 \text{ Па}$; $t_{и} = 0.8$ с, $Q = 7$.

медленным клапаном при истечении аргона из сопел диаметрами 0.3 и 0.7 мм. Газовые импульсы при длительностях $t_{\text{и}}$ от 1.0 с до 4.0 с имеют форму трапеции с выраженной плоской вершиной (рис. 5а). Параметры импульсов не зависят от давления, что подтверждают зависимости от времени $t_{\text{и}}$, нормированные к единице в максимуме, при всех использованных длительностях (рис. 5б–г). Длительность фронта импульсов не превышает 0.15 с, длительность спада 0.25 с. Наличие сформированной протяженной плоской вершины газового импульса, начиная с длительностей, превышающих 0.5–0.7 с, можно считать признаком формирования квазистационарного ядра импульсного газового потока.

Таким образом, “медленный” клапан позволяет обеспечить квазистационарное истечение газов. Однако стационарный режим истечения сверхзвуковой струи зависит не только от давления торможения, но и от давления фонового газа, в соответствии с формулой, определяющей размер первой “бочки” сверхзвуковой струи от среза сопла до прямой ударной волны (диска Маха), x_m [15]:

$$x_m = kd_*(P_0/P_\infty)^{0.5},$$

где константа k зависит от вида газа. Как показали наши измерения, скорость изменения фонового давления при включении и выключении клапана значительно меньше скорости формирования газового импульса.

Для выявления условий реализации квазистационарного режима по фоновому давлению с помощью вакуумметра Agilent CDG–500 проведены измерения зависимости изменения

давления фонового газа P_∞ в камере расширения от времени при работе медленного клапана с максимальным использованным давлением в форкамере сопла $P_0 = 400$ кПа. Полученные результаты (рис. 6) демонстрируют значительное запаздывание изменений фонового давления, вследствие чего при $t_{\text{и}} < 1$ с стационарного участка повышенного давления фона при работающем клапане не наблюдается. При этом, как показали дальнейшие измерения, длительность спада фонового давления до выхода к исходной величине разрежения зависит от расхода газа за импульс (т. е. от величины P_0), она варьируется от 1 до 2.5 с в исследованном диапазоне величин.

Таким образом, исходя из длительности процессов изменения плотности газовой струи и давления фонового газа при работе с использованной конфигурацией откачной системы, рекомендуемая длительность газового импульса составляет примерно 3 с. Выбор частоты следования импульсов (скважности) следует определять в соответствии с требуемым расходом газа. Увеличение частоты следования импульсов для проведения серии измерений в условиях повышенного, но стабильного фонового давления для данной клапанной системы невозможно. Поэтому использование медленного клапана не снижает нагрузку на вакуумную откачную систему, поскольку рабочий диапазон измерений определяется временем реакции вакуумной откачной системы на газовый импульс. Повышение скважности не оказывает влияния на данный фактор. Использование импульсного клапана секундного диапазона позволяет сэкономить в расходе рабочих газов, но не обеспечивает повышения эффективности имеющейся

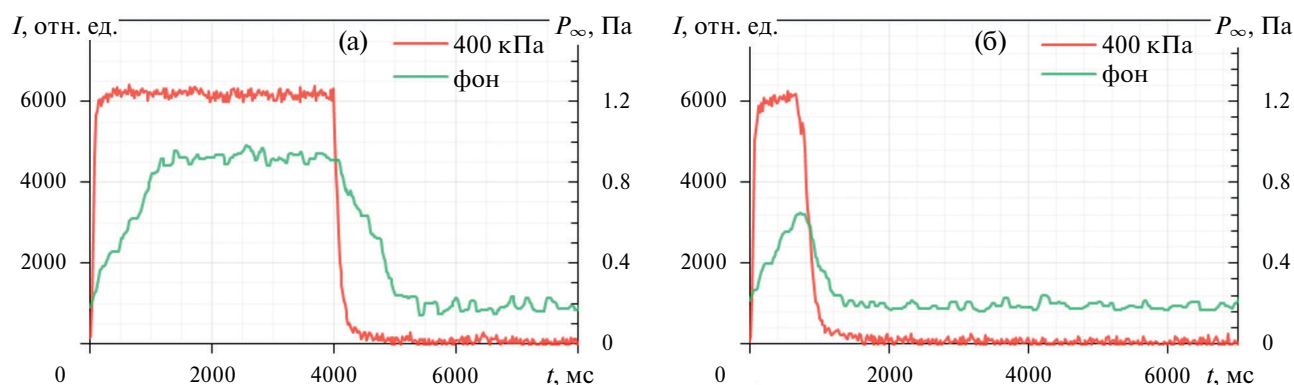


Рис. 6. Профиль изменения интенсивности излучения газового импульса и изменения фонового давления в камере расширения P_∞ , $d_* = 0.3$ мм: а – $t_{\text{и}} = 4000$ мс, $Q = 2$; б – $t_{\text{и}} = 700$ мс, $Q = 10$.

вакуумной системы откачки экспериментальной установки для моделирования процессов при повышенных расходах газов, пропорциональных произведению $P_0 \cdot d_*^2$, что является основной задачей при переходе на импульсные режимы истечения.

3.2. Импульсный клапан субмиллисекундного диапазона

Форма газовых импульсов при истечении аргона из звукового сопла диаметром 1 мм на расстоянии 50 мм от источника для нескольких давлений торможения и двух режимов по времени открывания клапана 0.5 и 1 мс приведена на рис. 7а. Абстрагируясь от деталей (длительности фронта и спада импульса, время достижения импульсом плоскости регистрации вниз по потоку от сопла, небольшая задержка открывания клапана при больших давлениях торможения и т.д.), на полученных профилях можно зафиксировать наличие квазистационарного ядра даже при времени открытия клапана 500 мкс (длительность плоской части импульса — не менее 200 мкс). Аналогичный результат был получен и для истечения азота, что иллюстрирует рис. 7б, где приведено сравнение форм газовых импульсов в аргоне и азоте.

Однако, как показано в работах [16, 17], область квазистационарного истечения уменьшается вниз по потоку, ограничивая возможности моделирования. Кроме того, при включении клапана в режиме многократных циклов требуется некоторое время для установления уровня фоновое давления, тем большее, чем выше расход газа в сопле. Экспериментально установлено, что в режимах со временем открытия клапана 1 мс при скважности 100 и частоте повторения импульсов 10 Гц даже при высоких расходах газа давление окружающего пространства стабилизируется через 3–5 с работы клапана (рис. 8). Это происходит после незначительного (примерно 15-процентного) роста над начальным, в отсутствие истечения газа, значением. В дальнейшем это давление не подвержено изменению. Поэтому несколько первых циклов включения — выключения клапана следует вынужденно отбраковывать в связи с меняющимся уровнем фоновое давления. Таким образом, необходимо выбирать условия, когда период стационарного истечения достаточен для регистрации искомых параметров

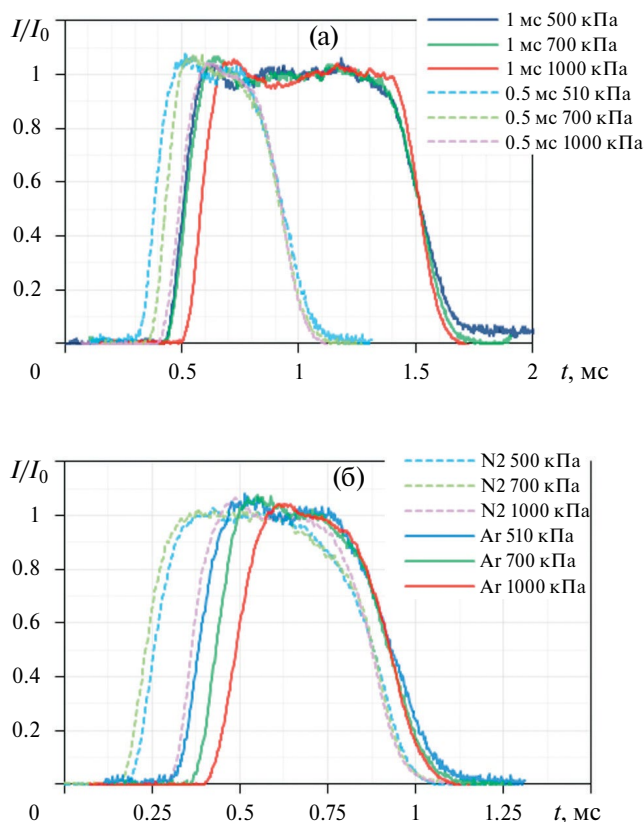


Рис. 7. Форма газовых импульсов при истечении аргона и азота из звукового сопла диаметром $d_* = 1$ мм на расстоянии 50 мм от источника при разных давлениях торможения: **а** — аргон, сравнение двух значений длительности импульса; **б** — сравнение импульсов в аргоне и азоте при одинаковой длительности.

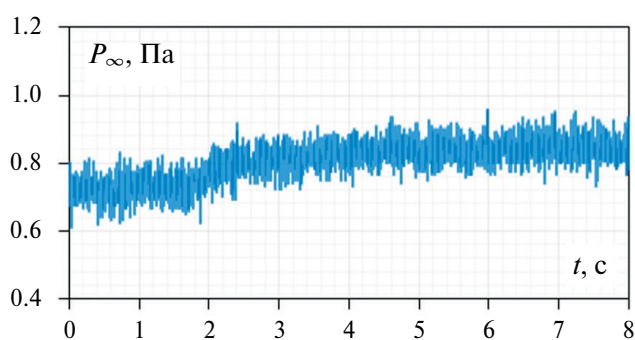


Рис. 8. Временная зависимость давления в камере расширения при работе быстрого импульсного клапана: $d_* = 1.0$ мм, $f = 10$ Гц, $P_0 = 600$ кПа.

потока. Как показали испытания, длительность импульса порядка 1 мс оказалась оптимальной для моделирования.

Таким образом, использование “быстро-го” клапана обеспечивает возможность выхода в импульсе на значительно более высокий

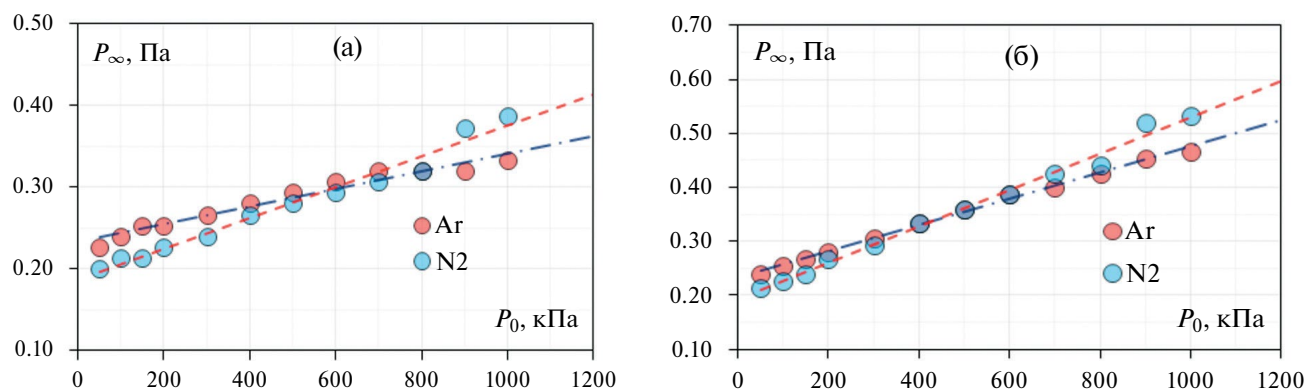


Рис. 9. Давление в камере расширения в зависимости от давления торможения в форкамере с “быстрым” импульсным клапаном: $f = 10$ Гц, $d_* = 1.0$ мм, длительности импульса $t_i = 0.5$ мс (а) и $t_i = 1.0$ мс (б).

уровень расходов исследуемых газов. В подтверждение данного факта на рис. 9 приведены зависимости установившегося давления в фоновом пространстве при длительной работе клапана с временем открытия 0.5 и 1.0 мс для азота и аргона в зависимости от давления торможения. Измерения выполнены до давления 1 МПа, однако очевидно, что откачная система может обеспечить устойчивую откачку истекающего газа и при более высоких давлениях торможения (расходах газа).

Для проверки достоверности результатов, получаемых при использовании данных на квазистационарном участке импульсной струи, были выполнены измерения относительной плотности при двух давлениях торможения (рис. 10).

Как и следовало ожидать, при низком уровне давления торможения, т.е. в отсутствие конденсации, данные совпали с изэнтропической зависимостью, за исключением начального участка, где возможен процесс столкновительного гашения флуоресценции. При высоком давлении торможения результаты вследствие конденсации регистрируются существенно ниже изэнтропической зависимости, рассчитанной по модели [15]. Тем не менее, хорошее совпадение с изэнтропической зависимостью в данных проверочных режимах нельзя считать полностью достоверным вследствие достаточно сложной процедуры тарировки для получения абсолютных значений плотности. В то же время, наклон зависимостей, близкий к изэнтропическому, убеждает авторов в возможности моделирования стационарных процессов с помощью “быстрой” импульсной системы.

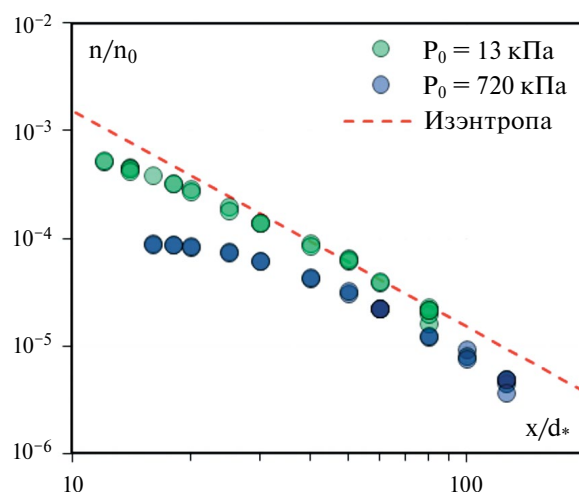


Рис. 10. Продольный профиль плотности аргона, истекающего из звукового сопла с $d_* = 1$ мм в импульсном режиме с “быстрым” клапаном.

4. ВЫВОДЫ

Основной целью использования описанных клапанных устройств являлось максимальное расширение диапазона расходных характеристик и, соответственно, газодинамических параметров истекающих из сопла сверхзвуковых струй при сохранении способности вакуумных насосов откачивать истекший газ в требуемом диапазоне давления остаточного фоновых газа. Фоновое давление в камере расширения при использовании “медленного” клапана, приведенное на рис. 6, и “быстрого” клапана — на рис. 8 и 9, поддерживалось на уровне около 1 Па и состояло более чем на 99.9% из рабочего газа, истекающего из сопла через клапанное устройство. Поэтому роль вклада иных газов

в состав фоновой среды в настоящей работе была несущественной.

Одной из важнейших задач работы являлась иллюстрация возможности при использовании быстрого импульсного клапана существенного повышения расходных характеристик соплового блока, достижения высоких значений давления в форкамере соплового блока (давления торможения) при устойчивом значении фонового давления, обеспечиваемого в режиме непрерывной откачки высоковакуумными насосами экспериментального стенда. Рисунки 8–10 демонстрируют, что эта цель была достигнута.

Проведенный анализ показал, что “медленные” клапаны секундного диапазона не позволяют продвинуться в область более высоких расходов по сравнению со стационарным истечением. В то же время, “быстрые” клапаны субмиллисекундного диапазона генерируют газовые импульсы с параметрами, необходимыми для моделирования режимов с высоким расходом при давлениях фонового газа, не перегружающих высоковакуумную откачную систему. Это открывает возможности выхода на большие расходы истечения с условиями, более близкими к натуральным. Описанные в работе устройства обеспечивают возможность моделирования в импульсе мгновенных расходов до нескольких десятков граммов рабочего газа в секунду при давлениях в форкамере до 2 МПа и давлении в окружающем пространстве и в области реакции ниже 1–3 Па. В работе продемонстрирован опыт использования комплекта звуковых и сверхзвуковых сопел с электромагнитным клапанным устройством, системами энергопитания и управления, обеспечивающими истечение газа из форкамеры в разреженное пространство в течение регулируемого промежутка времени от 0.3 до 1.5 мс с заданной скважностью, варьируемой в пределах от нескольких десятков до тысяч. Сформированные газовые импульсы имеют трапециевидную форму с квазистационарным ядром.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на оборудовании Центра коллективного пользования “Прикладная физика” Новосибирского государственного университета при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-19-00750).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Savinov S.Y., Lee H., Song H.K., Na B.-Ki // *Plasma Chem. Plasma Proc.* 2003. V. 23. № 1. P. 159. <https://doi.org/10.1023/A:1022477005020>
2. Jauberteau J. L., Thomas L., Aubreton J., Jauberteau I., Catherinot A. // *Plasma Chem. Plasma Proc.* 1998. V. 18. No. 1. P. 137. <https://doi.org/10.1023/A:1021797428416>
3. Fincke J.R., Anderson R.P., Hyde T.A., Detering B.A. // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2002. V. 41. P. 1425. <https://doi.org/10.1021/ie010722e>
4. Konno K., Onoe K., Takiguchi Y., Yamaguchi T. // *Chem. Eng. Research and Design.* 2015. V. 95. P. 144. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.01.012>
5. Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., Korobeishchikov N.G., Khodakov M.D., Yaskin A.S., Khudozhitkov V.E., Gimelshein S.F. // *IEEE Transact. Plasma Sci.* 2017. V. 45. Iss. 5. P. 819. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2682901>
6. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Коробейщиков Н.Г., Ходаков М.Д., Шмаков А.А. // *ПТЭ.* 2016. № 2. С. 127. <https://doi.org/10.7868/S0032816216010171>
7. Зарвин А.Е., Каляда В.В., Яскин А.С., Ходаков М.Д., Коробейщиков Н.Г., Художников В.Э., Мадирбаев В.Ж., Ездин Б.С. // *ПТЭ.* 2016. № 6. С. 50. <https://doi.org/10.7868/S0032816216060136>
8. https://www.gemssensors.com/docs/default-source/resource-files/catalog-pages/catalog_electronicnon-intrinsicallysaferelays.pdf
9. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А. // *ПТЭ.* 1975. № 5. С. 168.
10. Гартвич Г.Г., Дудников В.А., Зарвин А.Е., Каляда В.В., Мадирбаев В.Ж. // *ПТЭ.* 1997. № 2. С. 134.
11. Smith J.A., Driscoll J.F. // *J. Fluid Mech.* 1975. V. 72. Part 4. P. 695. <https://doi.org/10.1017/S0022112075003230>
12. Muntz E.P. // *Phys. Fluids.* 1962. V. 5. № 1. P. 80.
13. Косинов В.А., Кузнецов Л.И., Шарафутдинов Р.Г. // В сб.: Экспериментальные методы в динамике разреженных газов / Под ред. С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН. 1974. С. 174.
14. ГОСТ 16465 -70. Сигналы радиотехнические измерительные. Термины и определения Издание с Изменением № 1, 1973. Часть 1. Сборник стандартов. М.: Стандартинформ, 2005.
15. Ashkenas H.Z. and Sherman F.S. // *Proc. 4th RGD Symp.* 1966. V. 2. P. 84.
16. Коробейщиков Н.Г., Зарвин А.Е. // *Вестник НГУ: Серия Физика.* 2006. Т. 1. № 2. С. 29.
17. Зарвин А.Е., Коробейщиков Н.Г., Каляда В.В., Мадирбаев В.Ж. // *Вестник НГУ: Серия Физика.* 2007. Т. 2. № 4. С. 63.