

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук
Отделение физики плазмы, атомной физики и астрофизики
Лаборатория физической газодинамики

Орлов Филипп Алексеевич

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД АСПИРАНТА

**Экспериментальные измерения теплового потока в импульсных
течениях низкотемпературной плазмы, формируемой в течениях на
ударных трубах**

Санкт-Петербург

2025

Научный руководитель: Поняев Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник ФТИ им. Иоффе.

Рецензент:

Булович Сергей Валерьевич

кандидат физико-математических наук,
ведущий инженер ФТИ им. Иоффе

Рецензент:

Козлов Павел Владимирович,

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник МГУ имени
М.В. Ломоносова

109 Лаборатория кинетических процессов в газах
(Научно-исследовательский институт механики)

Содержание

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.....	4
Актуальность исследования	4
Цель работы:.....	6
Задачи работы:.....	6
Научная новизна работы:.....	6
Основные положения работы:.....	7
Личный вклад автора	7
Апробация работы.....	8
Глава 1 Описание экспериментальной установки и усилителей датчиков теплового потока.....	9
1.1 Описание ударной трубы.....	9
1.2 Описание усилителей датчиков теплового потока на основе термоэлектрически анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута	16
Выводы по Главе 1	19
Глава 2 Измерение теплового потока за отраженной ударной волной в различных газах.....	20
2.1 Проведение калибровки датчиков теплового потока.....	20
2.1 Измерение теплового потока за отраженной ударной волной в ксеноне, аргоне и углекислом газе	34
Выводы по Главе 2	46
Заключение.....	47
Список литературы	48

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Исследование тепловых потоков в условиях импульсных течений, формируемых в ударных трубах, представляет собой ключевую задачу в области газодинамики, теплофизики и проектирования высокоскоростных летательных объектов. В газодинамическом эксперименте в основном измеряют два тепловых параметра – температуру и тепловой поток. Тепловой поток имеет как величину, так и направление, что позволяет использовать его для исследования процесса теплообмена.

Измерение тепловых потоков также нужно для, верификации и валидации различных расчетных моделей, получения достоверных данных для проектирования теплозащиты, прогнозирования тепловых нагрузок на конструкции, исследования химической кинетики, изучения нестационарных процессов.

Ударные трубы, как экспериментальные установки, позволяют воспроизводить кратковременные процессы, характерные для сверхзвуковых и гиперзвуковых скоростей, ударных волн и переходных режимов течения. Такие условия возникают, например, при входе космических аппаратов в атмосферу, работе ракетных двигателей или внешнем обтекании элементов летательных аппаратов. В этих сценариях тепловые потоки достигают экстремальных значений, что делает их точное измерение критически важным для оценки тепловых нагрузок, разработки термостойких материалов и обеспечения надежности конструкций.

Тепловой поток в ударных трубах формируется под воздействием сложного сочетания факторов: резкого сжатия газа ударной волной, турбулентного перемешивания и вязкого диссипативного нагрева. Эти процессы, происходящие за доли секунды, создают значительные градиенты температуры и давления, что усложняет получение достоверных

экспериментальных данных. Традиционные методы измерения, такие как термопары, калориметрические датчики или инфракрасная термография, зачастую оказываются недостаточно эффективными из-за инерционности, ограниченного временного разрешения или низкой чувствительности в условиях кратковременных импульсов. Несовершенство измерительных технологий может привести к недооценке тепловых нагрузок, что чревато рисками для безопасности и эффективности инженерных решений.

В этой связи особую актуальность приобретает использование датчиков теплового потока на основе термоэлектрически анизотропных пленок. Их конструкция основана на материалах с выраженной анизотропией термоэлектрических свойств, что позволяет преобразовывать тепловую энергию в электрический сигнал с высокой точностью и минимальной задержкой. Отличительной особенностью таких датчиков является существенно повышенная чувствительность — на порядок выше, чем у классических термопар или тонкопленочных резисторов. В условиях импульсных течений это означает возможность регистрации быстропеременных тепловых потоков с высоким пространственно-временным разрешением, что критично для анализа пиковых нагрузок и валидации численных моделей.

Применение анизотропных термоэлектрических датчиков открывает новые перспективы для исследований в ударных трубах. Например, они позволяют детектировать локальные изменения теплопередачи в зонах отрыва потока или вблизи ударно-волновых взаимодействий, где традиционные методы дают усредненные или запаздывающие данные. Кроме того, их компактность и возможность интеграции в сложные поверхности облегчают проведение экспериментов без нарушения аэродинамики течения. Это особенно важно при изучении гиперзвуковых явлений, где даже незначительные искажения геометрии могут повлиять на результаты.

Цель работы:

Экспериментальное исследование тепловых потоков на торце камеры низкого давления ударной трубы в среде различных газов и плазмы.

Задачи работы:

- 1) Проведение экспериментальных исследований тепловых потоков в импульсных течениях низкотемпературной плазмы, возникающей при нагреве газа за ударными волнами.
- 2) Проведение экспериментальных исследований тепловых потоков в импульсных течениях потоков различных газов, возникающей при нагреве газа за ударными волнами.
- 3) Подбор экспериментальных режимов.
- 4) Определение оптических характеристик датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.
- 5) Определения влияния защитной пленки на быстродействие датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.
- 6) Совершенствования методики калибровки и системы регистрации сигнала датчиков теплового потока на основе анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута.
- 7) Определение вольт-ваттных коэффициентов датчиков теплового потока (датчик с единичным анизотропным термоэлементом из монокристалла висмута, датчик на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия, датчик на основе термоэлектрически анизотропной пленки из хрома) с целью использования их в эксперименте.

Научная новизна работы:

- 1) Определены вольт-ваттные коэффициенты датчиков теплового потока и впервые измерены данными типами датчиков тепловые потоки за отраженной ударной волной в среде углекислого газа.

- 2) Определены оптические характеристики датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.
- 3) Определено влияния защитной пленки на быстродействие датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.

Основные положения работы:

- 1) Установлено, что датчики на основе термоэлектрически анизотропных пленок из теллурида германия и хрома способны деградировать и требуется перед экспериментами проведение повторной калибровки.
- 2) Согласно данным калибровки, из-за наличия защитной пленки на датчике на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия снижается быстродействие датчика.
- 3) Эксперименты в аргоне показали хорошее совпадение результатов измерений, расчета и теории.
- 4) Эксперименты в углекислом газе показали влияние трехударной конфигурации на рост теплового потока, так как температура газа в ней значительно выше, чем в пристеночном слое то происходит увеличение теплового потока, что регистрируется в эксперименте и численном моделировании.
- 5) Эксперименты в ксеноне показали влияние ионизации за отраженной ударной волной на сигнал датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из хрома.

Личный вклад автора

Автор лично участвовал в постановке и проведении экспериментов, обработке данных, обсуждении результатов и подготовке научных публикаций.

Апробация работы

Апробация с результатами работы представлена в 4 публикациях:

- 1) Ф.А. Орлов, П.А. Попов, Н.А. Монахов, М.А. Котов. Измерение теплового потока за отраженной ударной волной датчиками на основе термоэлектрически анизотропной пленки // Неделя науки ФизМех: сборник статей Всероссийской научной конференции, 1–5 апреля 2024 г. СПб.: Политех-Пресс, 2024. С. 429–432.
- 2) Орлов Ф.А., Попов П.А., Шварц М.З., Поняев С.А., Котов М.А. Исследование электрических и оптических характеристик датчиков теплового потока на основе анизотропных пленок // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники: материалы 27-й Всероссийской молодежной научной конференции, г. Ульяновск, 22-24 октября 2024 г. Ульяновск: УлГТУ, 2024. С. 429–432.
- 3) Ф.А. Орлов, Н.А. Монахов, П.А. Попов, К.И. Белов. Влияние свойств рабочего газа на точность калибровки датчиков теплового потока с помощью отраженной ударной волны // Неделя науки ФизМех: сборник статей Всероссийской научной конференции, 31 марта – 4 апреля 2025 г. (в печати).
- 4) Ф.А. Орлов, Н.А. Монахов, П.А. Попов, К.И. Белов. Влияние свойств рабочего газа на точность калибровки датчиков теплового потока с помощью отраженной ударной волны // Неделя науки ФизМех: сборник статей Всероссийской научной конференции, 31 марта – 4 апреля 2025 г. (в печати).

Глава 1 Описание экспериментальной установки и усилителей датчиков теплового потока

1.1 Описание ударной трубы

Классическая ударная труба представляет собой длинную прямую трубу, разделенную на два отсека:

Секция высокого давления: заполнена толкающим (рабочим) газом под высоким давлением.

Секция низкого давления: содержит исследуемый газ при более низком давлении.

Секции разделены между собой диафрагмой или клапаном.

Процесс инициируется внезапным разрывом диафрагмы или открытием клапана, что приводит к формированию характерной системы волн, а именно образованием ударной волны, волны разрежения и контактной поверхности (рисунок 1).

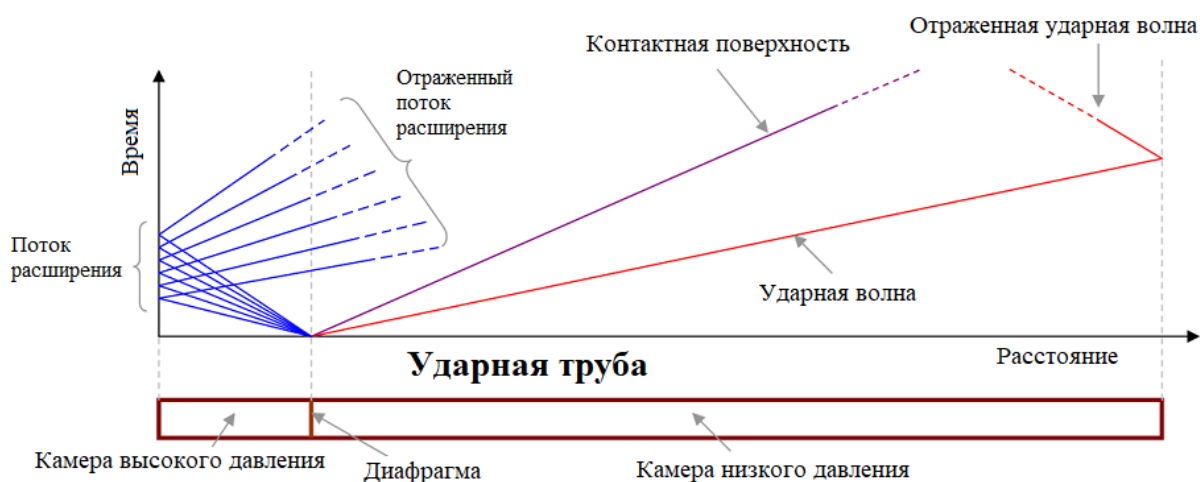


Рисунок 1 – Схема идеальной ударной трубы с x-t диаграммой

Ударная волна движется в секцию низкого давления, характеризуется резким увеличением давления, температуры и плотности. Скорость ударной волны превышает скорость звука в невозмущенном газе.

Волна разрежения распространяется в секцию высокого давления, вызывает снижение давления и плотности. Имеет непрерывную структуру, в отличие от скачкообразного изменения в ударной волне.

Контактная поверхность разделяет газы, изначально находившиеся по разные стороны от клапана или диафрагмы. Характеризуется разрывом плотности и температуры, но непрерывностью давления и скорости, движется со скоростью потока за ударной волной.

Эксперименты проводились на малой ударной трубе ФТИ им. А.Ф. Иоффе (рисунок 2). Камеры высокого и низкого давления могут быть разделены как клапаном, так и диафрагмой.



Рисунок 2 – Малая ударная труба ФТИ им. А.Ф. Иоффе:

- 1 – камера высокого давления; 2 – быстродействующий клапан;
3 – ресивер клапана; 4 - камера низкого давления; 5 – измерительная камера;
6 – промежуточная камера; 7 – демпферный бак

Длина камеры высокого давления составляет 1 м, камеры низкого давления 4.3 м, внутренний диаметр 50 мм.

При использовании металлических диафрагм в экспериментах, возможно неравномерное их раскрытие (рисунок 3b), что приводит к появлению таких эффектов, как неравномерности во фронте ударной волны и переходные возмущения [1], а также появление металлических частиц, уносимых и разгоняемых потоком газа из камеры высокого давления, которые могут повредить датчики.



(a)



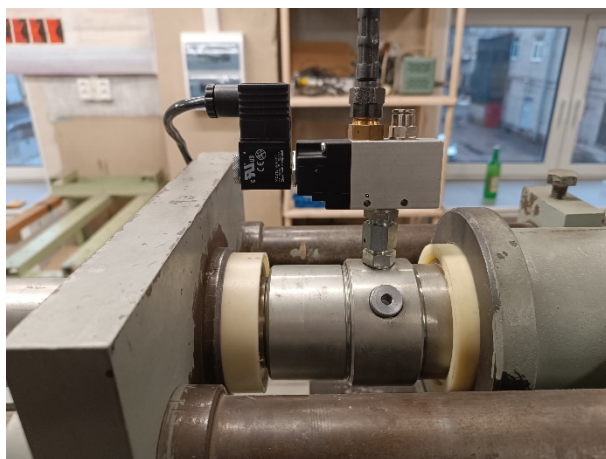
(b)

Рисунок 3 – Примеры раскрытия диафрагм:

(a) – равномерное раскрытие, (б) – неравномерное раскрытие

Для предотвращения повреждения датчиков теплового потока твердыми частицами, а также обеспечения большей повторяемости параметров при проведении серии экспериментов (в сравнении с использованием диафрагмы при проведении экспериментов), камеры ударной трубы были разделены с помощью быстродействующего клапана.

В зависимости от реализуемого режима в эксперименте, использовались два различных клапана. Диапазон рабочих давлений одного клапана составляет $1.0 \div 10.0$ МПа (рисунок 4а), другого $40.0 \div 60.0$ МПа (рисунок 4б). Полное время открытия клапана (от начала подачи управляющего электрического импульса до полного открытия) – 35 мс.



(a)

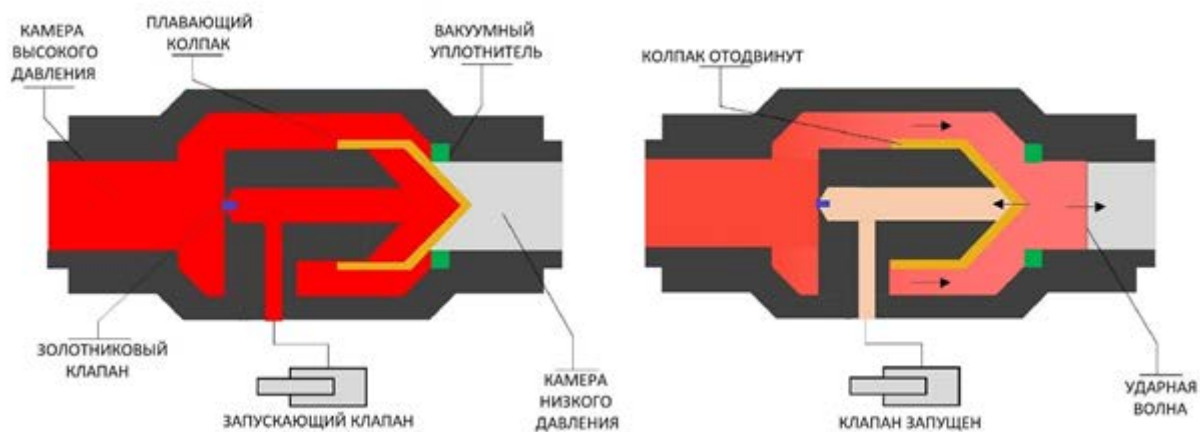


(б)

Рисунок 4 – Быстродействующие клапаны:

(a) – клапан для давлений $1.0 \div 10.0$ МПа, (b) – клапан для давлений $40.0 \div 60.0$ МПа

Принцип работы быстродействующего клапана можно упрощенно представить схемой, изображенной на рисунке 5.



(a) – Клапан закрыт

(b) – Клапан открыт

Рисунок 5 – Схема работы быстродействующего клапана

Измерения тепловых потоков проводились в режиме отражения падающей волны от торца камеры низкого давления (рисунок 6).

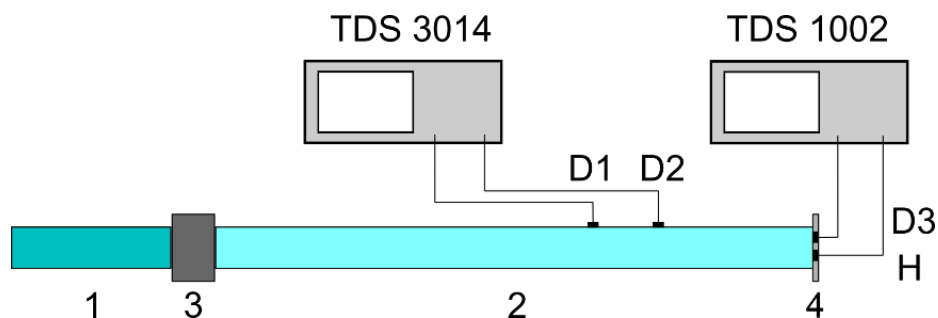


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки: (1) и (2) – камера высокого и низкого давления; (3) – быстродействующий клапан, (4) – фланец с датчиками; $D1 - D3$ – датчики давления; H – датчик теплового потока

Заподлицо с внутренней поверхностью камеры низкого давления установлены датчики давления $D1$ и $D2$ на расстоянии 35 мм друг от друга (рисунок 7), которые использовались для измерения скорости падающей ударной волны и давления за ней. В проведенных ранее тестовых экспериментах, было установлено, что величина и профиль давления за падающей волной, измеренные датчиками $D1$ и $D2$, а также за отраженной волной, измеренные датчиком $D3$ при использовании металлической диафрагмы и быстродействующего клапана полностью совпадает.

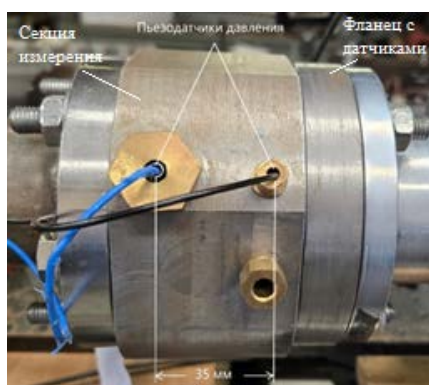


Рисунок 7 – Секция измерения давления и скорости падающей волны

Электрические сигналы регистрировались с помощью цифрового осциллографа с временным разрешением $0.1\text{ }\mu\text{s}$. В торце камеры низкого давления расположены датчик теплового потока H и датчик давления $D3$ РСВ 113В27, который использовался для определения момента прихода

падающей волны и контроля давления за отраженной волной. Их сигналы регистрировались с временным разрешением $0.02 \mu s$.

Торец камеры низкого давления представляет собой фланец с датчиками (рисунок 8). Фланец установлен после секции измерения давления и скорости падающей волны.

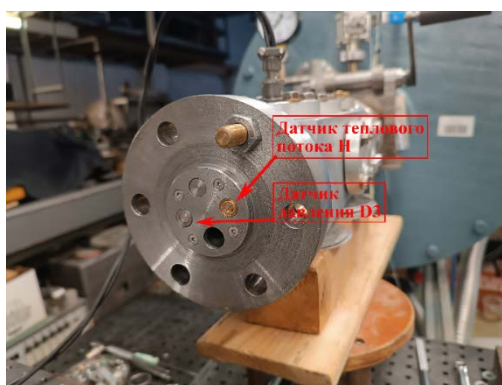


Рисунок 8 – Фланец с датчиками

Конфигурация фланца позволяет использовать до трех датчиков за один эксперимент. Отверстие в нем используется для выхода газа в демпферный бак. Датчики вмонтированы в универсальные для фланца вставки (рисунок 9а) с выходом на microdot для последующего подключения (рисунок 9b).



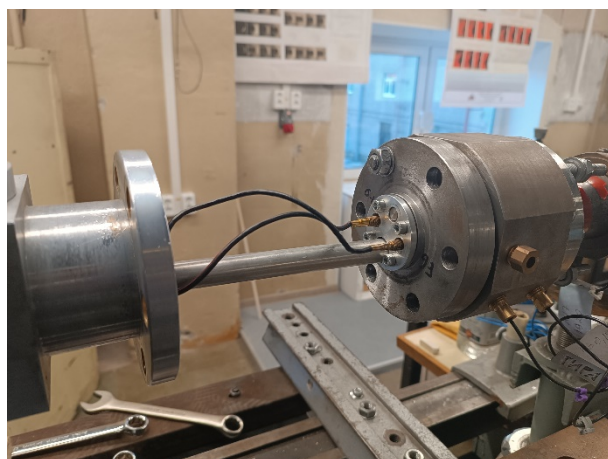
(а)



(б)

Рисунок 9 – Пример вставки с датчиком (а) и задняя сторона фланца с установленными датчиками (б)

С целью защиты проводов системы регистрации от обрыва потоком газа, в заднюю часть фланца вкручивается трубка по которой газ перетекает в демпферный бак не взаимодействуя с проводами (рисунок 10а).



(a)



(b)

Рисунок 10 – Фланец с установленной трубкой и подключенными датчиками
(a) и подключенные кабели системы регистрации к промежуточной камере
(b)

Провода, подключенные к датчикам выведены на разъемы типа 2рмг промежуточной камеры, через которые подключена остальная часть системы регистрации (рисунок 10b).

1.2 Описание усилителей датчиков теплового потока на основе термоэлектрически анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута

Перед использованием датчиков теплового потока в эксперименте, требуется провести калибровку данного датчика и определить его вольт-ваттный коэффициент.

В силу малого выходного сигнала датчика ($\sim 6 \text{ мкВ}$), требуется использование усилителей сигнала. В начальных экспериментах использовался усилитель на основе инструментального усилителя, реализованного в микросхеме INA128. Принципиальная схема усилителя представлена на рисунке 11.

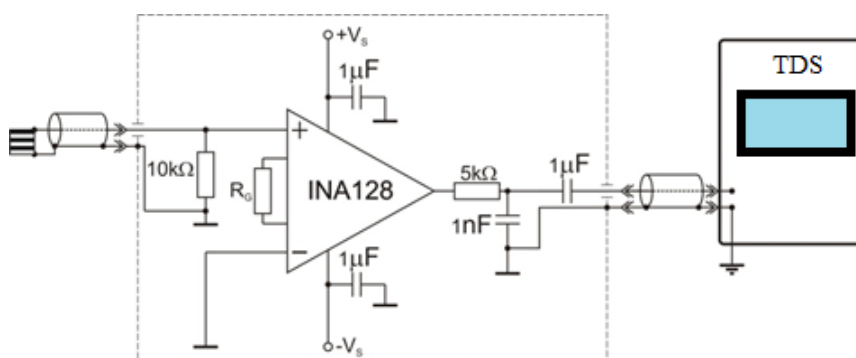


Рисунок 11 – Схема усилителя на микросхеме INA128

Усилитель на микросхеме INA128, использованный в начальных экспериментах представлен на рисунке 12.

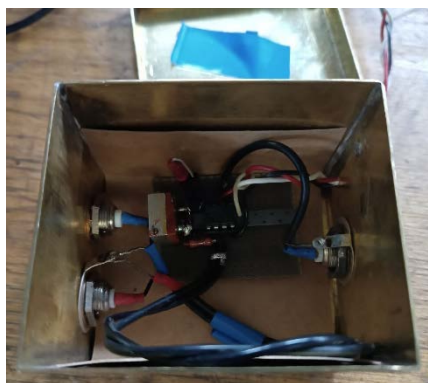


Рисунок 12 – Усилитель на базе микросхемы INA128

На форму выходного сигнала и полосу пропускания усилителя помимо микросхемы влияет коэффициент усиления. Важной задачей является обеспечение оптимального соотношения сигнала к шуму, а также получение достоверной формы сигнала.

На рисунке 13 представлен исходный прямоугольный сигнал с генератора, подаваемый на вход INA128 и выходной сигнал, нормированный на коэффициент усиления.

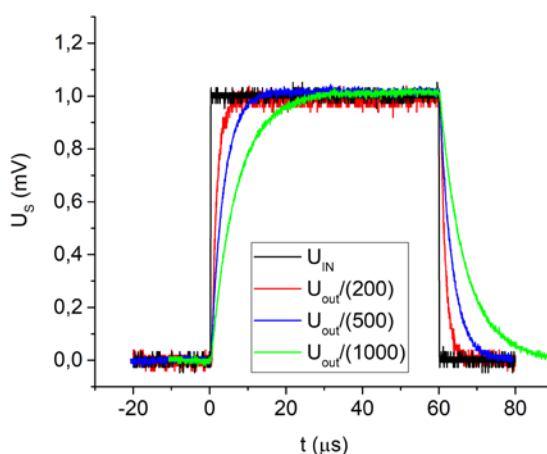


Рисунок 13 – Влияние коэффициента усиления на форму выходного сигнала усилителя на базе микросхемы INA128

Как видно из рисунка 13 использование данного усилителя, например, при коэффициенте усиления 500 сглаживание выходного сигнала по времени составляет ~ 10 мкс, что является критическим при измерении явлений с характерным временем ~ 1 мкс, к которым относятся тепловые измерения, за отраженной ударной волной.

В ходе модернизации системы регистрации был разработан усилитель на основе микросхемы AD8429 с заявленной полосой пропускания 15 МГц по уровню -3 db, заменивший ранее применявшийся усилитель на базе INA128 с полосой 1.3 МГц при единичном усилении. Схема усилителя аналогична схеме на микросхеме INA128. Усилитель на микросхеме AD8429 представлен на рисунке 14.

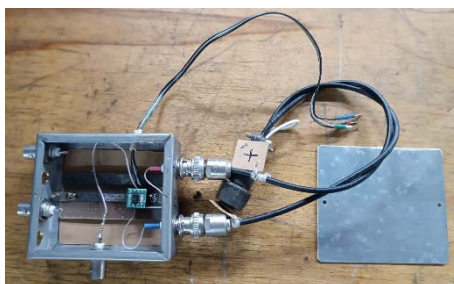


Рисунок 14 – Усилитель на базе микросхемы AD8429

На рисунке 15 показано сравнение форм выходного сигнала для усилителей на базе микросхем INA128 и AD8429 при минимально допустимом коэффициенте усиления для данных экспериментов.

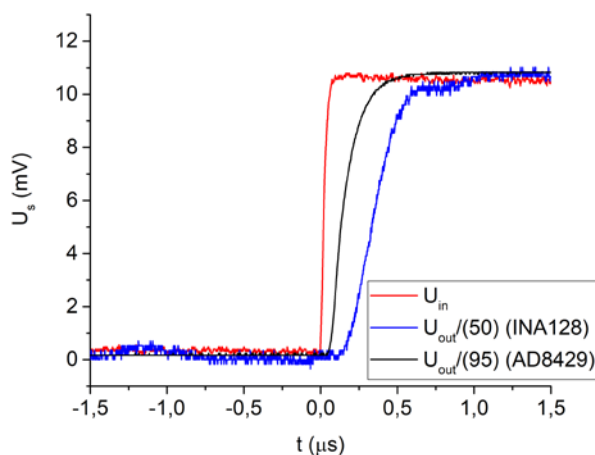


Рисунок 15 – сравнение форм выходного сигнала для усилителей на базе микросхем INA128 и AD8429

Видно, что применение AD8429 позволило уменьшить сглаживание сигнала, что принципиально важно при регистрации теплового потока в процессах с характерным временем $\sim 1 \mu s$.

Выводы по Главе 1

Использование быстродействующего клапана позволяет избежать механического повреждения датчиков металлическими фрагментами, которые могут образоваться при использовании диафрагмы, а также обеспечивает большую повторяемость параметров при проведении эксперимента.

Проведено сравнение характеристик усилителей датчика теплового потока на основе анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута на основе микросхем INA128 и AD8429. Тестовое сравнение выходных сигналов усилителей, путем подачи прямоугольного импульса с генератора, показало преимущество усилителя на базе AD8429 ввиду большей полосы пропускания микросхемы при оптимальных для обоих усилителей коэффициентов усиления.

Глава 2 Измерение теплового потока за отраженной ударной волной в различных газах

2.1 Проведение калибровки датчиков теплового потока

Измерение конвективных и лучистых тепловых потоков является базовым методом диагностики в газодинамическом эксперименте на ударных трубах. Движение конвективного теплового потока обусловлено как переносом тепла от одних порций газа к другим путем теплопроводности, так и вследствие макроскопического движения, при котором тепло передается от одной точки газовой среды к другой вместе с массой газа. Радиационный тепловой поток обусловлен процессом переноса энергии путем превращения внутренней энергии излучаемого вещества последовательно в энергию излучения, энергию необходимую для переноса излучения и поглощением излучаемой энергии облучаемым телом.

Проведение тепловых измерений в экспериментах на ударных трубах используется для исследования процессов теплообмена вблизи поверхности моделей, обтекаемых сверхзвуковым потоком газа, определения теплофизических параметров газов при высоких температурах, кинетических процессов за сильными ударными волнами, процессов воспламенения газообразного топлива. Основными особенностями являются малое рабочее время экспериментов от $1\ \mu s$ до $1\ ms$, высокая плотность тепловых потоков $\sim 1\ MW/m^2$, высокие температуры, достигающие $10000\ K$. Актуальным направлением в области научного приборостроения является разработка новых датчиков теплового потока, обладающих высоким быстродействием, широким динамическим диапазоном и достаточной механической прочностью.

Для измерения тепловых потоков использовались три типа датчиков:

1. Датчик на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.
2. Датчик на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома.

3. Датчик теплового потока на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута.

Датчик на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия (рисунок 16) имеет размер $4 \times 5 \text{ mm}$ и толщиной пленки $\approx 0,3 \text{ }\mu\text{m}$. Для защиты от окисления, на его рабочей поверхности нанесена защитная пленка толщиной $\approx 0.1 \text{ }\mu\text{m}$.

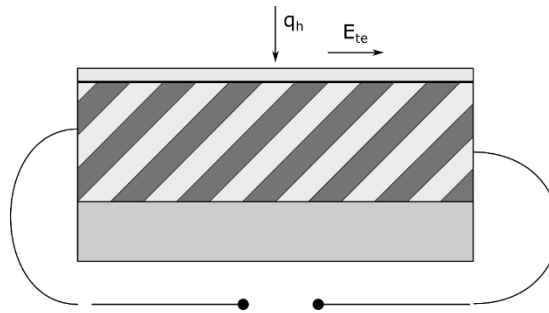


Рисунок 16 – Схема чувствительного элемента датчика

Принцип действия основан на генерации термоэлектрического поля в анизотропной пленке в направлении, перпендикулярном вектору теплового потока [2]. Электрический сигнал описывается соотношением $U = \alpha \lambda A (T_h - T_0) / h$, где α и λ – эффективный коэффициент термоэдс и теплопроводности пленки, A и h – ее площадь и толщина, T_h и T_0 – температура рабочей и тыльной поверхности. В стационарном тепловом режиме, сигнал связан с тепловым потоком соотношением $U = AS_0 q$, где S_0 – вольт-ваттный коэффициент.

Перед непосредственным проведением экспериментов по измерению теплового потока при внешнем обтекании или исследовании внутренних течений, над датчиками требуется провести процедуру калибровки, чтобы получать достоверные данные о уровне тепловых потоков, зафиксированных во время работы датчика. Результатом калибровки является определение величины вольт-ваттного коэффициента датчика.

При калибровке в условиях стационарного теплового режима датчик помещают на испытательный стенд, где на него воздействует тепловой поток с заданной плотностью q , а затем фиксируют выходной электрический сигнал U [3].

Для измерения импульсных тепловых потоков, характерных для газодинамического эксперимента, более предпочтительна калибровка в нестационарном режиме, например, с использованием отраженной ударной волны. Этот метод отличается простотой реализации и широко применяется для поверки коаксиальных термопар [4, 5]. В этом случае погрешность определения вольт-ваттного коэффициента обусловлена точностью измерения исходного давления рабочего газа в камере низкого давления ударной трубы, а также значением числа Маха набегающей ударной волны.

По начальным данным эксперимента рассчитывалось теоретическое значение теплового потока в торец ударной трубы за отраженной волной. В одномерном приближении, при отсутствии диссоциации и ионизации газа, зависимости коэффициента теплопроводности $\lambda \sim T^\nu$ и плотности $\rho \sim T^{-1}$, а также постоянной теплоемкости C_p оно может быть рассчитано по соотношению [6]:

$$q(t) = 1.13 \sqrt{\frac{\rho_5 \lambda_5 C_5}{2t}} T_5 \sqrt{\frac{1 - \theta_w^\nu}{\nu} - \frac{1 - \theta_w^{\nu+1}}{\nu + 1}} \quad (1)$$

где ρ_5 , λ_5 , C_5 – плотность, теплопроводность и теплоемкость газа за отраженной ударной волной, t – время, $\theta_w = T_5/T_w$ – отношение температуры газа за отраженной ударной волной к температуре стенки, $\nu = 0.75$. Для сравнения экспериментальных и теоретических данных удобно использовать постоянное значение нормированного теплового потока $q \cdot \sqrt{t}$, зависящее только от параметров газа. Далее, подбирался такой вольт-ваттный коэффициент S_0 , при котором отличие теоретического и среднего экспериментального значения $q \cdot \sqrt{t}$ было минимально. Ранее было

установлено, что сразу после отражения падающей волны, тепловой поток достигает максимального значения за время $\sim 0.1 \mu s$ за которой следует фаза установившегося теплообмена, описываемое зависимостью (1). Наличие первой фазы с быстрым изменением теплового потока позволяет оценить динамические характеристики датчика.

Аргон при температурах до начала ионизации в полной мере удовлетворяет исходным предположениям зависимости (1) и данный режим рассматривался в качестве эталонного. Представляет интерес анализ возможности использования азота в качестве рабочего газа, несмотря на увеличение C_p на 10% в данном диапазоне температур.

В таблице 1 приведены начальные условия экспериментов и рассчитанные по ним свойства рабочего газа за отраженной волной, а также значение приведенного теплового потока и полученного вольт-ваттного коэффициента. Свойства газа рассчитывались с помощью программной платформы Cantera [7] и пакета SDToolbox [8].

Таблица 1 – Начальные условия экспериментов, рассчитанные параметры исследуемого газа за отраженной волной, теоретическое и осредненное экспериментальное значение приведенного теплового потока и полученный вольт-ваттный коэффициент датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки теллурида германия

M_1	P_1, kPa	T_5, K	$\rho_5, kg/m^3$	$C_{p5}, J/(kg \cdot K)$	$\lambda_5, W/(m \cdot K)$	$(q\sqrt{t})_{th}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$(\overline{q\sqrt{t}})_{exp}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$S_0, mV/W$
2.45	6.67 Ar	1453	0.603	520	0.0594	3151	3153	7.0
2.24	6.67 N ₂	845	0.573	1133	0.06126	2125	2135	7.4

Результаты калибровки датчика на основе анизотропной пленки теллурида германия представлены на рисунках 17-18. Черной кривой показан

сигнал датчика теплового потока, синей кривой измеренное давление за отраженной волной, красной кривой приведенный тепловой поток, полученный в режиме $M_1 = 2.45$ (Рисунок 17 (а и b)) и в режиме $M_1 = 2.24$ (Рисунок 18 (а и b)).

Горизонтальная линия соответствует теоретическим значениям, рассчитанным по начальным условиям экспериментов. Вертикальными линиями показан диапазон осреднения экспериментального значения приведенного теплового потока. Наблюдаемые осцилляции сигнала датчика давления связаны с особенностями установки во фланце и не вызваны газодинамическими причинами. Видно, что наличие защитной пленки увеличивает время установления в датчике стационарного распределения температуры, а соответственно уменьшает его быстродействие.

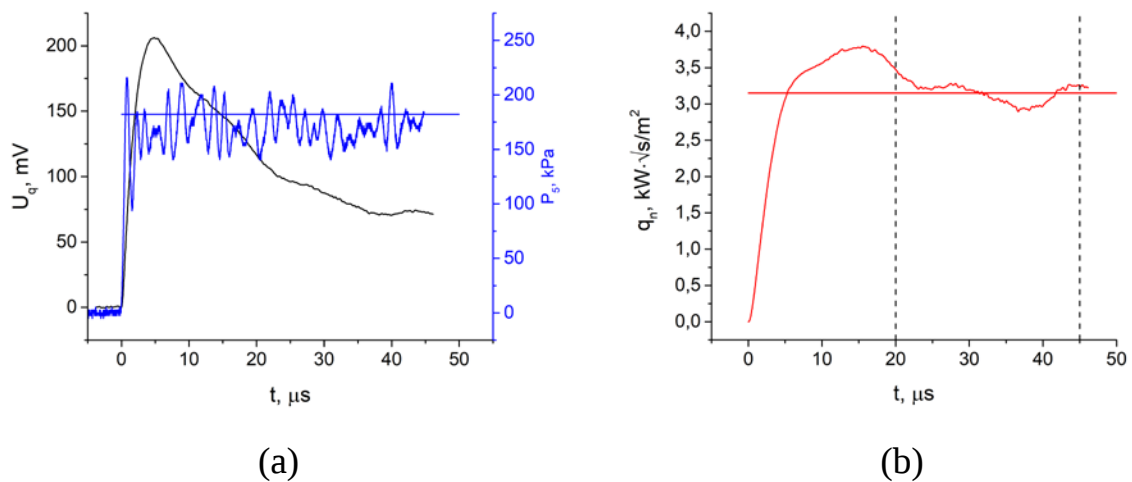
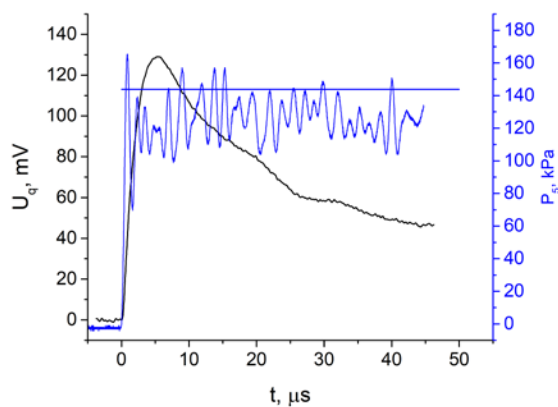
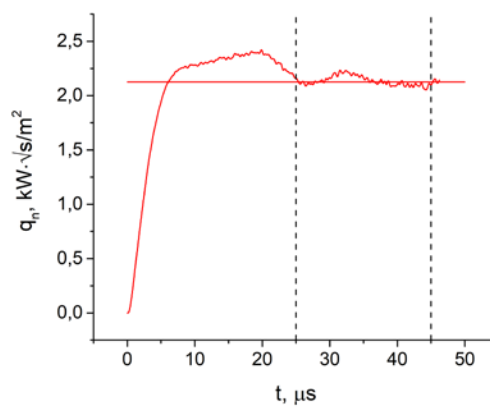


Рисунок 17 – Сигнал датчика теплового потока (черная кривая), измеренное давление за отраженной ударной волной (синяя кривая) (а) и приведенный тепловой поток (красная кривая) (b), полученный в режиме $M = 2.45$.

Использование азота в качестве рабочего газа приводит к завышению вольт-ваттного коэффициента на $\approx 10\%$ (Рисунок 18 (b)).



(c)



(d)

Рисунок 18 – Сигнал датчика теплового потока (черная кривая), измеренное давление за отраженной ударной волной (синяя кривая) (a) и приведенный тепловой поток (красная кривая) (b), полученный в режиме $M = 2.24$.

При проведении повторной калибровки в среде аргона спустя год после данных экспериментов (в этом году), проведенных выше, было обнаружено, что датчик со временем деградирует, так как его вольт-ваттный коэффициент изменился и составляет 7.8 mV/W .

Также исследовалась спектральная чувствительность данного датчика. Для исследования спектральной чувствительности датчика использовалась установка для измерения спектральных характеристик фотоэлектрических преобразователей. В этом случае, мощность излучения, контролируемая кремниевым фотодиодом, составляла $10 \div 100 \text{ нВт}$ в зависимости от установленной длины волны монохроматического излучения. По электрическому сигналу с исследуемого датчика определялось соотношение сигнала датчика к мощности падающего излучения. Результаты измерения вольт-ваттного коэффициента в диапазоне длин волн $400 - 1150 \text{ нм}$ приведены на рисунке 19.

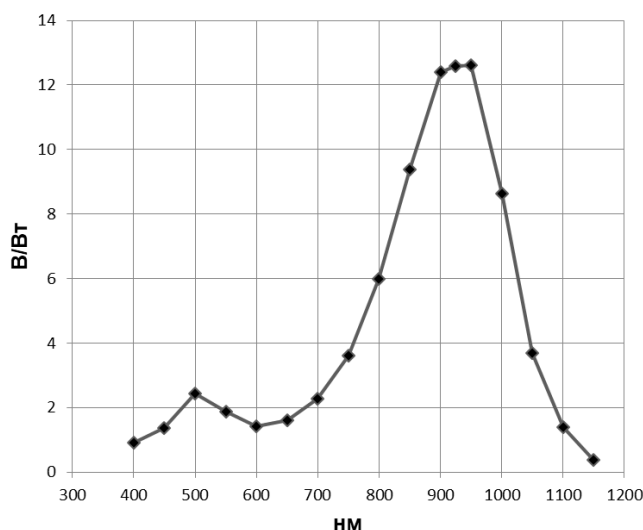


Рисунок 19 – Вольт-ваттный коэффициент датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки теллурида германия в диапазоне длин волн 400-1150 нм.

Измерение интегральной степени черноты датчика проводилось при облучении ксеноновым световым источником с плотностью излучения $\sim 1.2 \text{ кВт/м}^2$. Регистрируемый электрический сигнал достигал 200 мВ , что соответствует интегральной степени черноты $\bar{\epsilon} = 1.5 \cdot 10^{-3}$.

Полученное значение интегральной степени черноты позволяет сделать вывод о возможном использовании данного датчика для проведения измерений лучистого теплового потока с высоким временным разрешением.

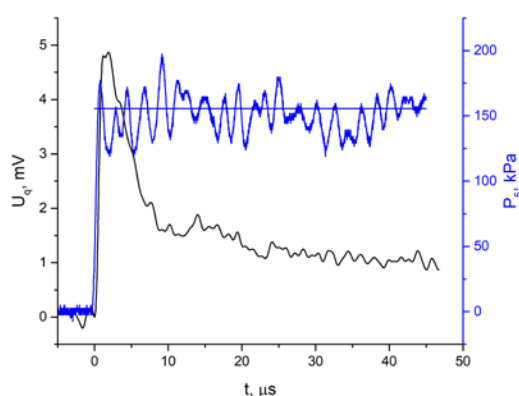
Полученная спектральная характеристика данного датчика позволит оценить вклад лучистого теплообмена в полный тепловой поток в экспериментах, сопряженных с появлением излучения в различных газах.

В таблице 2 представлены начальные условия эксперимента для калибровки датчика на основе анизотропной пленки хрома.

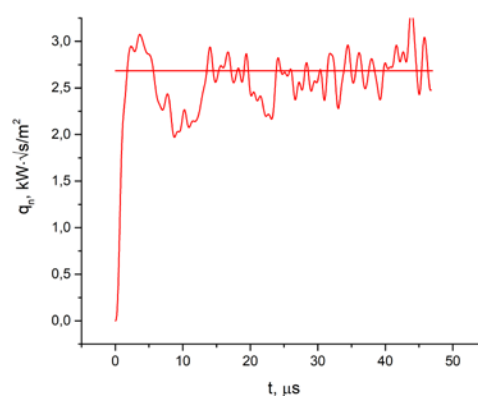
Таблица 2 – Начальные условия эксперимента, рассчитанные параметры исследуемого газа за отраженной волной, теоретическое и осредненное экспериментальное значение приведенного теплового потока и полученный вольт-ваттный коэффициент датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома

M_1	P_1, kPa	T_5, K	$\rho_5, kg/m^3$	$C_{p5}, J/(kg \cdot K)$	$\lambda_5, W/(m \cdot K)$	$(q\sqrt{t})_{th}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$(\overline{q\sqrt{t}})_{exp}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$S_0, mV/W$
2.32	6.67 Ar	1302	0.574	520	0.0548	2566	2687	0.24

Результаты калибровки датчика на основе анизотропной пленки хрома представлены на рисунке 20. Черной кривой показан сигнал датчика теплового потока, синей кривой измеренное давление за отраженной волной, красной кривой приведенный тепловой поток, полученный в режиме $M_1 = 2.32$ (а и б).



(a)



(b)

Рисунок 20 – Сигнал датчика теплового потока (черная кривая), измеренное давление за отраженной ударной волной (синяя кривая) и приведенный тепловой поток (красная кривая), полученный в режиме $M = 2.32$ (а и б)

Датчик имеет размеры $3 \times 3 \text{ mm}$ и толщиной пленки $\approx 0.4 \text{ }\mu\text{m}$. (рисунок 21).

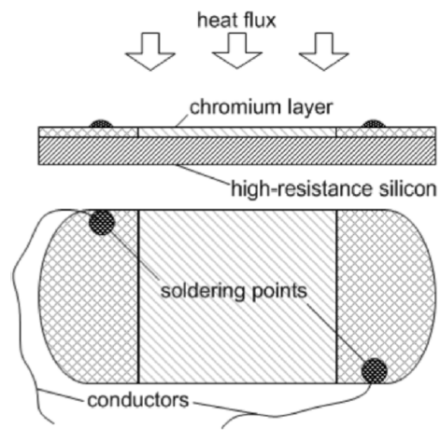


Рисунок 21 – Схема чувствительного элемента датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома [9]

Принцип действия аналогичен с датчиком на основе термоэлектрически анизотропной пленки теллурида германия. Вольт-ваттный коэффициент датчика, определенный годом ранее, составлял 0.4 mV/W . Данный факт позволяет сделать вывод о том, что данный датчик со временем также деградирует.

Калибровка датчика на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута (рисунок 22) проводилась при использовании двух различных усилителей. Датчик теплового потока на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута размером $4.5 \times 0.74 \text{ mm}$ и толщиной 0.35 mm был установлен в торце камеры низкого давления на расстоянии 14 mm от оси трубы.

Его принцип действия основан на генерации термоэлектрического поля в направлении, перпендикулярном вектору теплового потока [6]. Чувствительным элементом таких датчиков является батарея анизотропных термоэлементов, выполненных из монокристалла висмута, закрепленных на слюдяной подложке (2) и отделенных друг от друга лавсановыми полосками (3) (рисунок 22). Концы соседних термоэлементов соединены пайкой (4). К

внешним термоэлементам припаяны провода (5) для подключения к осциллографу [10].

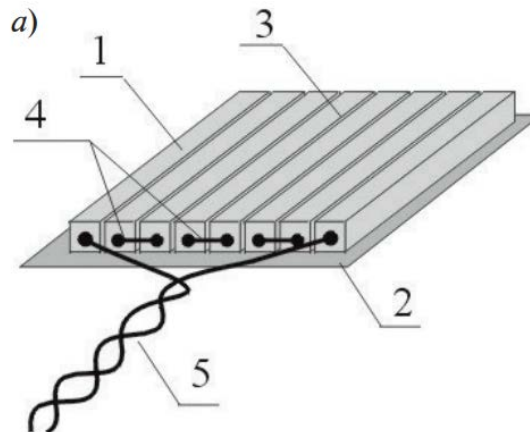


Рисунок 22 – Схематическое изображение чувствительного элемента датчика на основе термоэлемента из монокристалла висмута

В рамках одномерной тепловой и термоэлектрической модели, используемой в методе расчета теплового потока, электрический сигнал связан с перепадом температуры между рабочей и тыльной поверхностями термоэлемента следующим соотношением:

$$[T_0(t) - T_h(t)] = \frac{hU_s(t)}{S_0\lambda_y A}$$

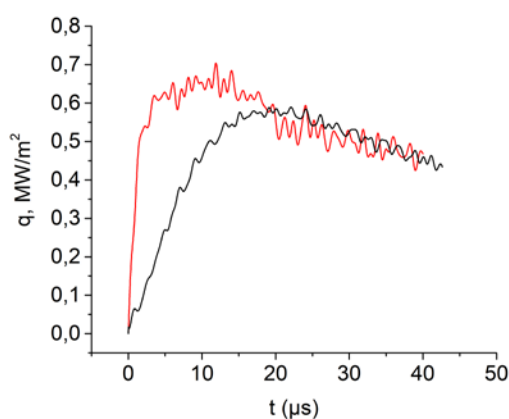
где U_s – электрический сигнал, зарегистрированный в эксперименте, h – высота термоэлемента, A – площадь термоэлемента, λ_y – эффективная теплопроводность термоэлемента в вертикальном направлении, S_0 – искомый вольт-ваттный коэффициент.

В таблице 3 представлены начальные условия экспериментов и рассчитанные по ним параметры рабочего газа за отраженной ударной волной, приведенный тепловой поток и вольт-ваттный коэффициент.

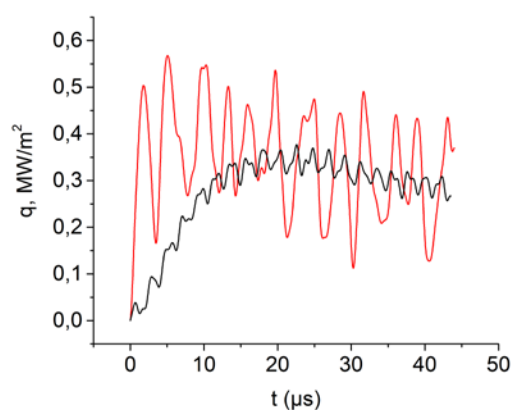
Таблица 3 – Начальные условия экспериментов, рассчитанные параметры исследуемого газа за отраженной волной, теоретическое и осредненное экспериментальное значение приведенного теплового потока и полученный вольт-ваттный коэффициент датчика на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута

M_1	P_1, kPa	T_5, K	$\rho_5, kg/m^3$	$C_{p5}, J/(kg \cdot K)$	$\lambda_5, W/(m \cdot K)$	$(q\sqrt{t})_{th}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$(\overline{q\sqrt{t}})_{exp}, W \cdot \sqrt{s}/m^2$	$S_0, mV/W$
2.32	6.67 Ar	1316	0.574	520	0.0548	2589	2624	5.0
2.09	6.67 N ₂	759	0.511	1112	0.0561	1622	1666	5.2

На рисунках 23а и 23b представлены тепловые потоки, зафиксированные в экспериментах $M_1 = 2.32$ и $M_1 = 2.09$.



(a)

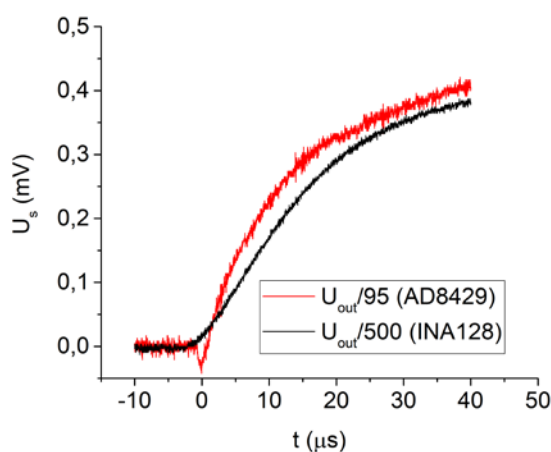


(b)

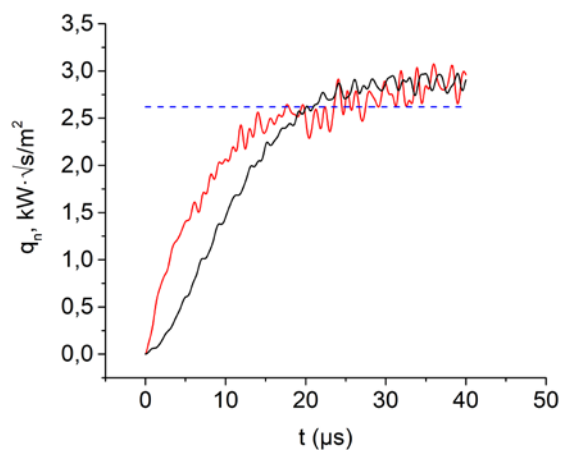
Рисунок 23 – Тепловые потоки, измеренные при использовании усилителя на INA128 (черные кривые) и AD8429 (красные кривые), полученные в экспериментах $M_1 = 2.32$ (а и б) и $M_1 = 2.09$ (с и d).

На рисунках 24а и 24с приведены исходные электрические сигналы датчика, а также рассчитанные по ним приведенные тепловые потоки

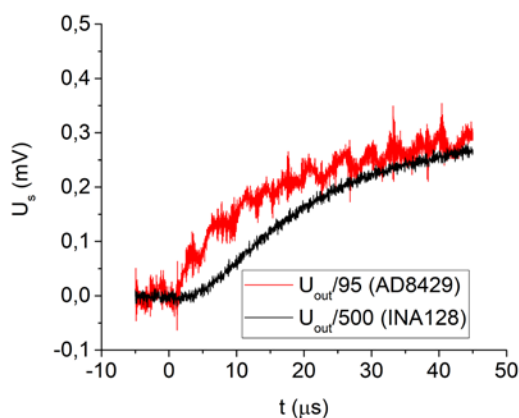
(рисунки b и d) для эксперимента $M_1 = 2.32$ (рисунки a и b) и $M_1 = 2.09$ (рисунки c и d).



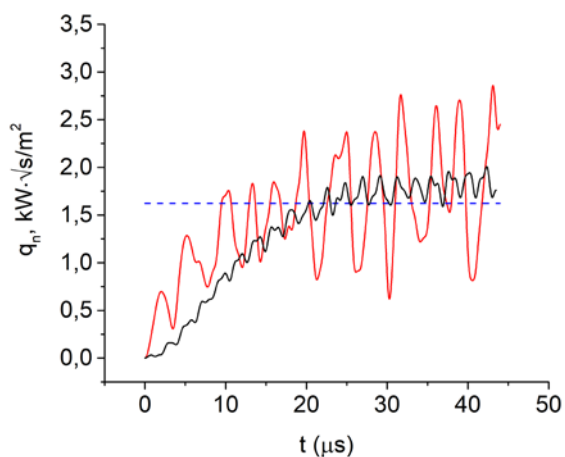
(a)



(b)



(c)



(d)

Рисунок 24 – Исходный сигналы датчика, приведенный тепловой поток при использовании усилителя на INA128 (черные кривые) и AD8429 (красные кривые), теоретический приведенный тепловой поток (синие пунктирные линии), полученный в эксперименте 1943 (a и b) и 1939 (c и d).

Красным цветом показаны приведенные тепловые потоки при использовании AD8429 (коэффициент усиления $\times 95$) и черным при использовании INA128 (коэффициент усиления $\times 500$). Горизонтальной линией показано теоретическое значение, рассчитанное по начальным

условиям экспериментов. Перед расчетом теплового потока, электрические сигналы были сглажены с помощью Фурье фильтра с частотой среза 1.25 MHz . Видно, что меньшая полоса пропускания INA128 приводит к заметному сглаживанию кривой на начальной фазе теплообмена и уменьшению участка, где $q\sqrt{t} \approx \text{const}$, а также завышению получаемого значения вольт-ваттного коэффициента. В случае AD8429 возникает скачкообразное падение сигнала, вызванное особенностями работы данного усилителя. Необходимо отметить, что опыт применения датчиков с несколькими термоэлементами и большим электрическим сигналом, но без промежуточного усилителя показывает, что начальная фаза, где $q\sqrt{t} \neq \text{const}$ не превышает $1\text{ }\mu\text{s}$. Использование азота приводит к появлению сильных осцилляций электрического сигнала, имеющих газодинамическую природу, что отражается на форме рассчитываемого теплового потока и завышению получаемого вольт-ваттного коэффициента датчика на $\approx 4\%$.

Основным фактором, ограничивающим длительность фазы одномерного невозмущенного теплообмена в торце ударной трубы, является приход в точку расположения датчика возмущений, вызванных взаимодействием отраженной ударной волны с пограничным слоем и волной разрежения от истечения рабочего газа через дренажное отверстие. В качестве характерной длины можно принять расстояние от центра датчика до внутренней поверхности камеры низкого давления 10 mm . Скорость распространения возмущений ограничена скоростью звука за отраженной ударной волной (для режима

$M_1 = 2.32$ скорость звука из расчета составляет 672 м/с , для режима $M_1 = 2.09$ составляет 554 м/с). Таким образом, оценка снизу длительности фазы невозмущенного теплообмена составляет $\approx 20\text{ }\mu\text{s}$. Как видно из результатов измерений, приведенный тепловой поток в начальной фазе теплообмена длительностью $\approx 10\text{ }\mu\text{s}$ оказывается сильно сглажен и не пригоден для

дальнейшего исследования, а общая длительность невозмущенного теплообмена не превышает $40 \mu s$.

Полученные результаты показывают, что использование двухатомного газа, который не в полной мере удовлетворяет исходным положениям одномерной теории теплообмена за отраженной ударной волной приводит к незначительному изменению значения вольт-ваттного коэффициента. Принципиальное ограничение максимальной длительности невозмущенного теплообмена демонстрируют важность модернизации системы регистрации и использование усилителей с максимально широкой полосой пропускания.

2.1 Измерение теплового потока за отраженной ударной волной в ксеноне, аргоне и углекислом газе

Ксенон обладает несколькими важными свойствами, которые влияют на измерения теплового потока за отраженными ударными волнами:

- **Высокая молекулярная масса:** ксенон является тяжелым инертным газом (атомная масса $\approx 131,3$ а.е.м.), что создает более сильные градиенты плотности на ударных волнах по сравнению с более легкими газами. Это влияет на термодинамические условия за отраженными ударными волнами, включая температуру и давление, что напрямую влияет на измерения теплового потока.
- **Низкое отношение теплоемкостей:** одноатомная природа ксенона дает ему отношение удельных теплоемкостей (γ) приблизительно 1,66, что влияет на скачок температуры на ударных волнах. Для отраженных ударных волн это свойство влияет на достигаемые температуры торможения, которые критически важны для исследований теплового потока.
- **Высокая плотность:** высокая плотность ксенона по сравнению с другими исследуемыми газами означает, что он обладает большей тепловой инерцией, что может влиять на скорость теплопередачи и развитие теплового пограничного слоя за отраженными ударными волнами.
- **Низкая теплопроводность:** ксенон имеет относительно низкую теплопроводность по сравнению с более легкими газами, что влияет на механизмы теплопередачи за отраженными ударными волнами, особенно в области пограничного слоя, где часто проводятся измерения теплового потока.
- **Ионизация при высоких температурах:** за сильными отраженными ударными волнами ксенон может подвергаться значительной ионизации, что изменяет его термодинамические и транспортные свойства, влияя на процессы теплопередачи и измерения.

- Радиационный теплообмен: при высоких температурах за отраженными ударными волнами ксенон проявляет более сильные эффекты радиационного теплообмена из-за своей электронной структуры, что может быть значительным компонентом общего теплового потока.

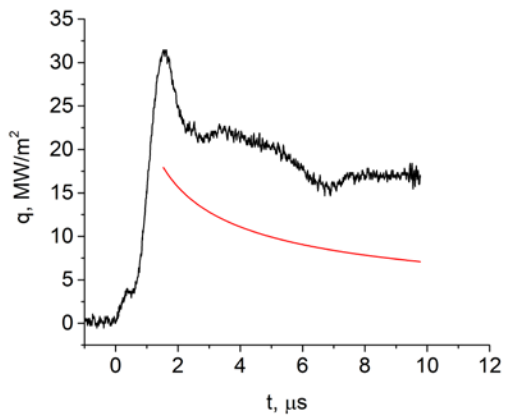
- Более длительное рабочее время (время измерения): благодаря своей высокой молекулярной массе, ксенон обычно обеспечивает более длительное время испытаний в экспериментах с ударными трубами по сравнению с более легкими газами, что может быть преимуществом для измерений теплового потока, требующих достаточного временного разрешения.

В таблице 4 представлены начальные условия экспериментов, рассчитанные параметры исследуемого газа за отраженной волной.

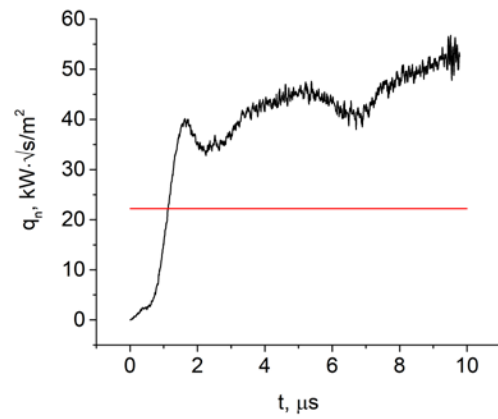
Таблица 4 – Начальные условия экспериментов, рассчитанные параметры исследуемого газа за отраженной волной

M_1	P_1, kPa	P_4, MPa	P_5, MPa	T_5, K	α
6.01	4.0 Xe	1.3 He	0.97	7685	4,14E – 03
6.9	4.0 Xe	1.3 H ₂	1.26	8973	1,66E – 02
8.16	2.0 Xe	1.3 H ₂	0,86	9944	4,94E – 02

На рисунках 25-27 представлены результаты измерения тепловых потоков в ксеноне при данных режимах. Данные измерения были получены с использованием датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома. Видно, что максимальные значения теплового потока возрастают с увеличением числа Маха падающей ударной волны. Помимо экспериментальных тепловых потоков на рисунках приведены расчетные теоретические конвективные тепловые потоки.

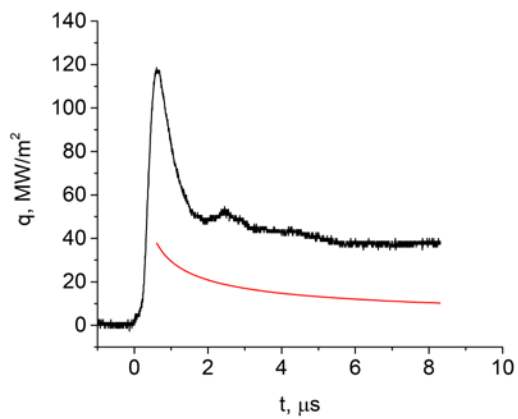


(a)

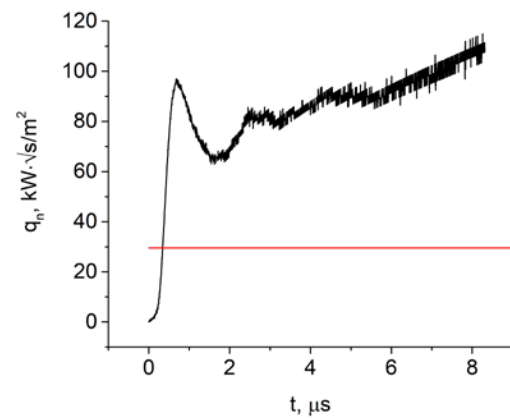


(b)

Рисунок 25 –Тепловой поток (a) и приведенный тепловой поток (b) (черные кривые – эксперимент, красные кривые – теоретический расчет) для режима $M_1 = 6.01$



(a)



(b)

Рисунок 26 –Тепловой поток (a) и приведенный тепловой поток (b) (черные кривые – эксперимент, красные кривые – теоретический расчет) для режима $M_1 = 6.9$

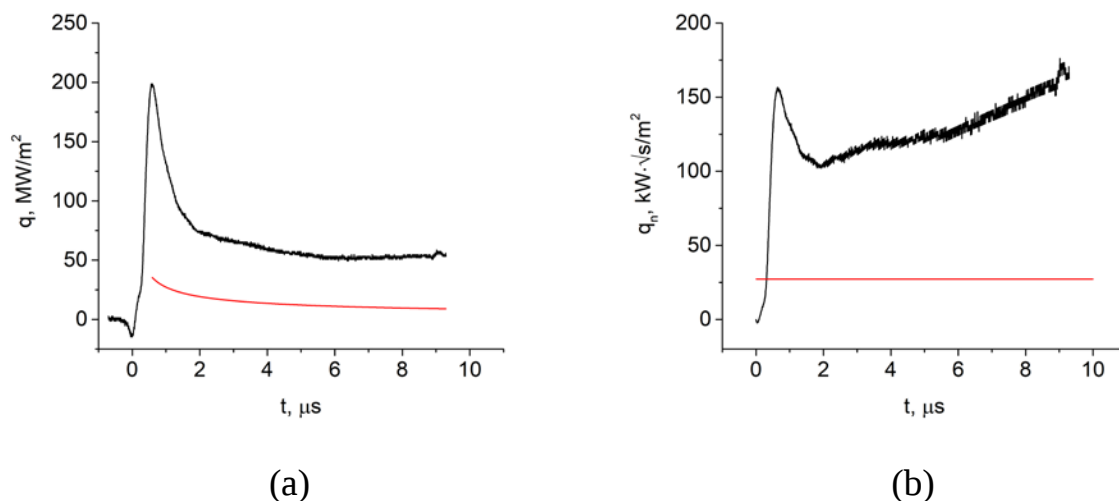


Рисунок 27 –Тепловой поток (а) и приведенный тепловой поток (b) (черные кривые – эксперимент, красные кривые – теоретический расчет) для режима $M_1 = 8.16$

С учетом рассчитанных параметров температуры за отраженной ударной волной и степени ионизации ксенона для режима $M_1 = 8.16$ можно сделать вывод о том, что в ксеноне образовалась низкотемпературная плазма. При данной температуре преобладает однократная ионизация ($\text{Xe} + e^- \rightarrow \text{Xe}^+ + e^- + e^-$) [11]. Появляется электропроводность, которая может влиять на измерения в ударной трубе (отрицательные значения сигнала датчика теплового потока в начальный момент времени). В таких случаях расчет прямого теплового потока по сигналу датчика некорректен.

Электропроводность, предположительно связана с появлением электронов-предвестников перед ударной волной путем диффузии электронов из постударной области, как впервые было предложено в работах [12,13].

Во всех трех режимах заметно серьезное отклонение величин тепловых потоков, полученных в экспериментах от теоретических, это связано с регистрацией датчиком теплового потока излучения ксенона. Тем самым лучистый тепловой поток вносит значительный вклад в полный тепловой поток, зарегистрированный в эксперименте.

Далее речь пойдет о экспериментальном и численном исследовании теплообмена в торце камеры низкого давления ударной трубы за отраженной ударной волной в аргоне и углекислом газе.

Начальные условия экспериментов (таблица 5) были выбраны исходя из требования постоянства химического состава рабочего газа. Равновесные параметры за отраженной волной рассчитаны с помощью Nenzfld [14] с учетом реальных свойств.

Полученный с помощью калибровки по отраженной ударной волне вольт-ваттный коэффициент датчика теплового потока на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута составляет 5.0 mV/W . Датчик был установлен в торце камеры низкого давления на расстоянии 14 mm от оси трубы. В системе регистрации использовался промежуточный усилитель с коэффициентом усиления $\times 95$ на основе микросхемы AD8429 с полосой пропускания 15 MHz по уровню -3 db при единичном усилении. Применение усилителя позволило значительно повысить точность измерений, но привело к сглаживанию кривой теплового потока в начальной фазе длительностью $\approx 10 \mu\text{s}$.

Таблица 5 – Начальные условия экспериментов и рассчитанные равновесные параметры рабочего газа за отраженной ударной волной.

M_1	Re	P_1, kPa	T_5, K	$a_5, m/s$	$\left(\overline{q\sqrt{t}}\right)_{th}'$ $W \cdot \sqrt{s}/m^2$
2.32	$5.9 \cdot 10^5$	6.67 Ar	1316	676	2600
3.91	$3.0 \cdot 10^7$	26.66 Ar	3519	1105	28000
3.36	$3.2 \cdot 10^7$	6.53 CO ₂	1061	486	7500
4.86	$3.1 \cdot 10^7$	3.99 CO ₂	1779	624	19700

Численное моделирование ламинарного течения в области отражения в осесимметричной постановке выполнено с помощью Eilmer [14]. На левой

границе задавались параметры рабочего газа за падающей ударной волной, рассчитанные с помощью Nenzf1d, на остальных границах задавалась постоянная температура и условие прилипания. Задание постоянных значений по времени и оси y не позволяют в полной мере воспроизвести структуру пограничного слоя за падающей волной, однако это не оказывает существенного влияния на течение за отраженной ударной волной при малых временах. Невязкие потоки рассчитывались с помощью схем AUSMDV и гибридной Hanel-AUSMDV для анализа влияния неустойчивости моделирования ударной волны на структуру течения. Итоговая сетка, на которой была достигнута сеточная сходимость состояла из 200 000 ячеек, размер пристеночной ячейки составлял $1 \mu m$. Длительность выбиралась исходя из оценки времени невозмущенного теплообмена, когда справедлива одномерная модель теплообмена [6].

На рисунках 28a и 28b представлены тепловые потоки q , полученные в эксперименте и расчете с использованием схемы AUSMDV для экспериментов в аргоне.

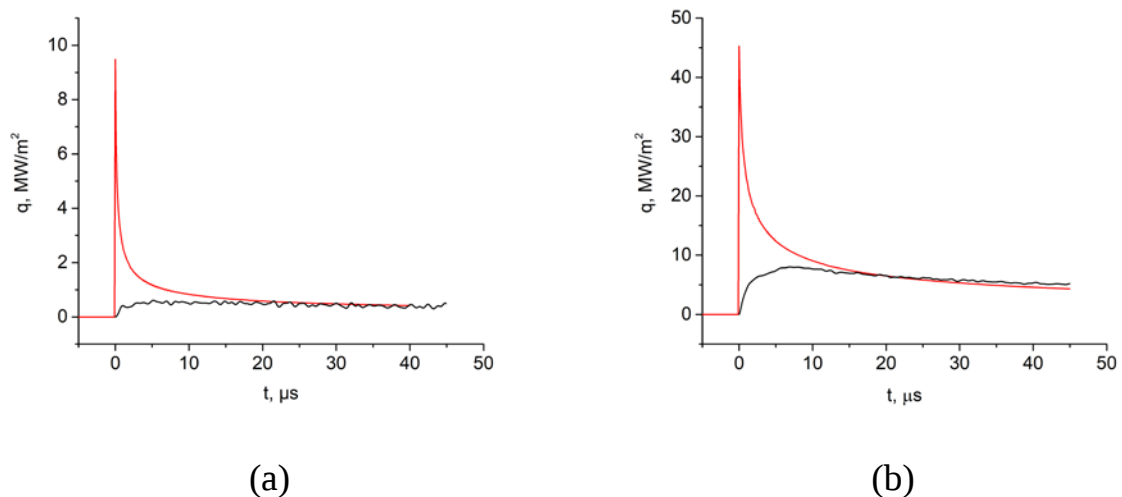
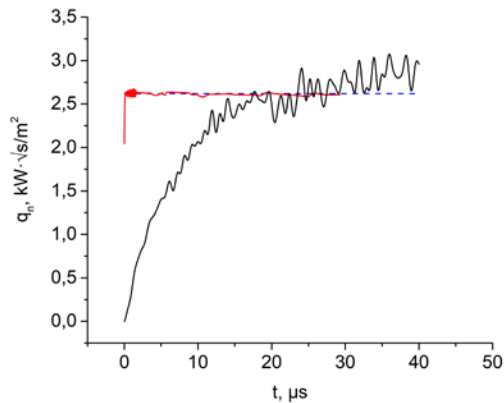
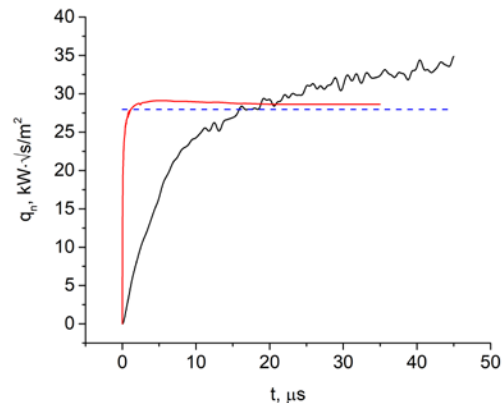


Рисунок 28 –Тепловой поток, полученный в эксперименте (черные кривые), и расчете (красные кривые) для аргона в экспериментах $M_1 = 2.32$ (a) и $M_1 = 3.91$ (b)

На рисунках 29а и 29b представлены приведенные тепловые потоки $q\sqrt{t}$, пунктирной линией показано теоретическое значение, рассчитанное по [6] для аргона.



(a)

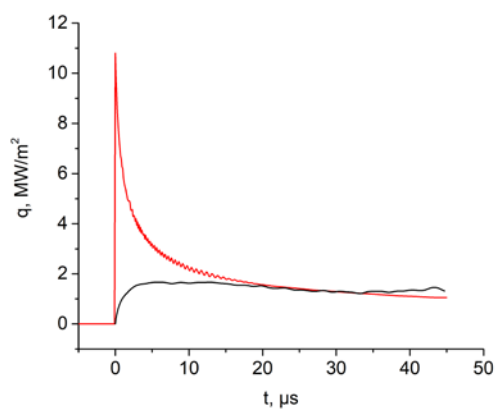


(b)

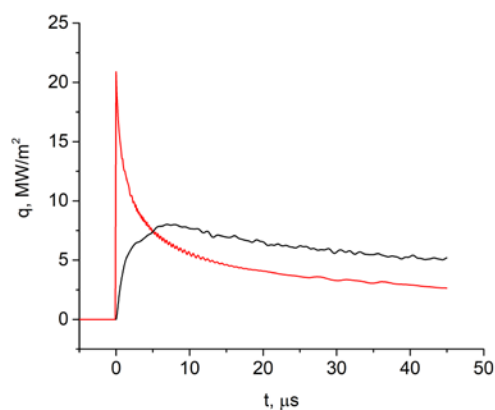
Рисунок 29 – Приведенный тепловой поток, полученный в эксперименте (черные кривые), расчете (красные кривые) и по теоретической зависимости (синие пунктирные линии) для аргона в экспериментах $M_1 = 2.32$ (a) и $M_1 = 3.91$ (b)

Видно, что в случае с аргоном наблюдается хорошее совпадение результатов измерений, расчета и теории. Увеличение скорости звука за отраженной волной в эксперименте $M_1 = 3.91$ приводит к значительному сокращению длительности фазы стационарного теплообмена, где $q\sqrt{t} = \text{const}$ (рисунок 29b).

На рисунках 30а и 30b представлены тепловые потоки q , полученные в эксперименте и расчете с использованием схемы AUSMDV для экспериментов в углекислом газе.



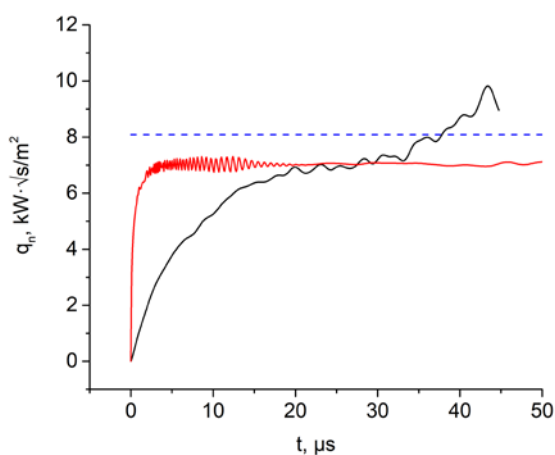
(a)



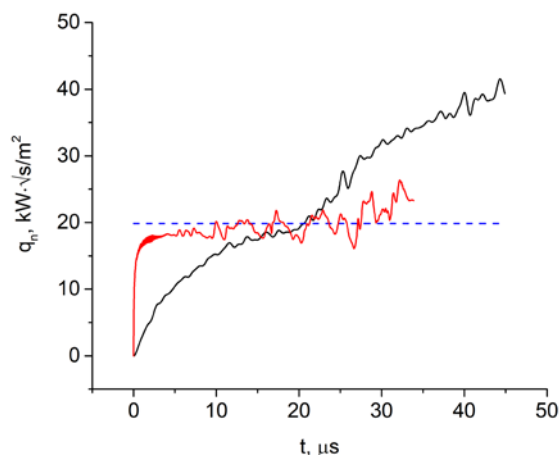
(b)

Рисунок 30 –Тепловой поток, полученный в эксперименте (черные кривые), и расчете (красные кривые) для углекислого газа в экспериментах $M_1 = 3.36$ (a) и $M_1 = 4.86$ (b)

На рисунках 31a и 31b представлены приведенные тепловые потоки $q\sqrt{t}$, пунктирной линией показано теоретическое значение, рассчитанное по [6] для углекислого газа.



(a)



(b)

Рисунок 31 – Приведенный тепловой поток, полученный в эксперименте (черные кривые), расчете (красные кривые) и по теоретической зависимости (синие пунктирные линии) для углекислого газа в экспериментах $M_1 = 3.36$ (a) и $M_1 = 4.86$ (b)

В случае с углекислым газом результаты измерений и расчета совпадают, но наблюдается заметное отклонение приведенного теплового потока от теоретического значения, поскольку исходные положения теории [6] не в полной мере применимы к расчету тепловых потоков за отраженной ударной волной в среде углекислого газа.

Существенное различие показателя адиабаты $\gamma = 5/3$ (аргон) и $\gamma = 4/3$ (углекислый газ) исследуемых газов приводит к принципиально различной структуре отраженной ударной волны и течения за ней (рисунок 32). Причиной возникновения бифуркации и далее отрыва течения является превышение давления за отраженной ударной волной над давлением торможения в пограничном слое. В аргоне не возникает бифуркации отраженной волны [15], газ за ней неподвижен, в отличие от углекислого газа, где возникает трехударная конфигурация и газ приходит в движение. Это приводит к принципиально различному радиальному распределению давления и теплового потока в торце ударной трубы. Необходимо отметить, что высокочастотные осцилляции вызваны неустойчивостью схемы AUSMDV, а низкочастотные – газодинамическими причинами. Применение гибридной Hanel-AUSMD схемы позволяет частично устранить вычислительные артефакты, однако общая физическая картина остается неизменной.

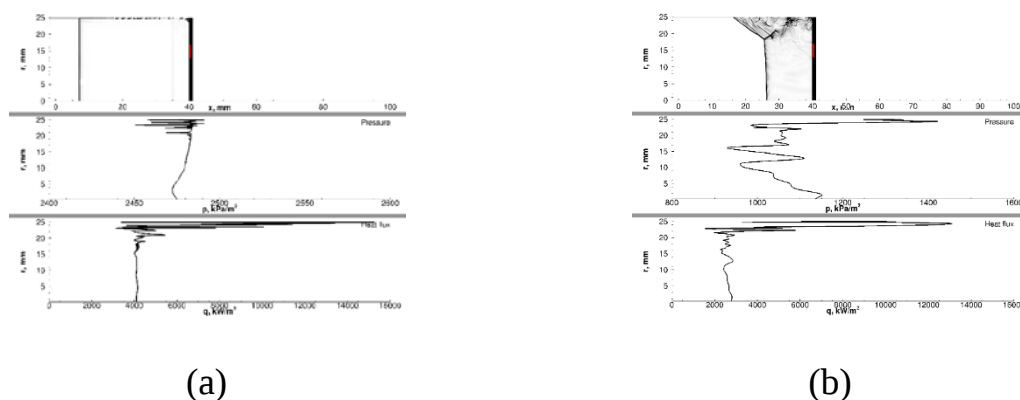


Рисунок 32 – Градиент плотности, радиальное распределение давления и теплового потока в торце ударной трубы в аргоне (рисунок а) и в углекислом газе (рисунок b) через $50 \mu s$ после отражения падающей

ударной волны.

Формирование трехударной конфигурации в углекислом газе приводит к образованию сложной нестационарной вихревой структуры вблизи торца ударной трубы. С течением времени размеры области увеличиваются и в какой-то момент достигают точки расположения датчика теплового потока $r = 14 \text{ mm}$ (рисунок 33).

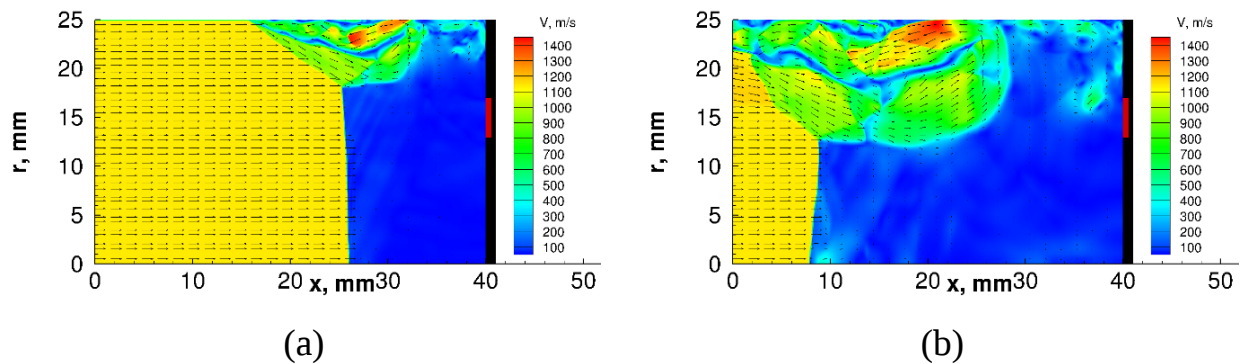
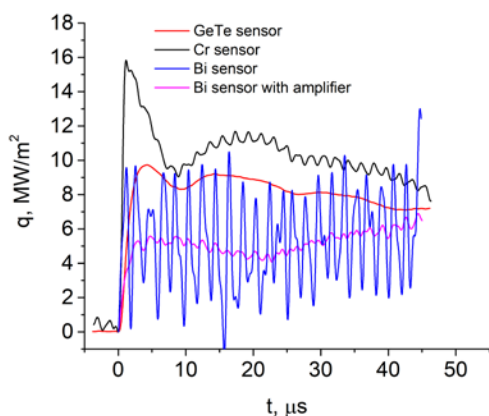


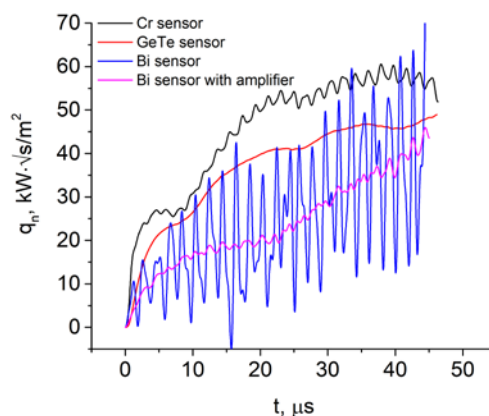
Рисунок 33 – Модуль и вектор скорости в углекислом газе в момент времени $50 \mu\text{s}$ (рисунок а) и $100 \mu\text{s}$ (рисунок б) после отражения ударной волны.

Поскольку температура газа в ней значительно выше, чем в пристеночном слое то происходит увеличение теплового потока, что регистрируется в эксперименте и численном моделировании (рисунок 22b).

На рисунках 34а и 34б представлены тепловые потоки для режима $M_1 = 4.86$, полученные в эксперименте с использованием трех видов датчиков сразу.



(a)



(b)

Рисунок 34 – Тепловой поток, полученный в эксперименте $M_1 = 4.86$ тремя видами датчиков

Черными кривыми показаны тепловые потоки, измеренные с помощью датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома, красными кривыми с помощью датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия. Синими кривыми показан исходный сигнал датчика на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута. К датчику параллельно был подключен усилитель на основе AD8429 с измененным коэффициентом усиления с $\times 95$ на $\times 9.8$. Тепловые потоки, измеренные с использованием усилителя показаны розовой кривой.

Как видно из результатов использование усилителя для датчика на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута позволяет значительно снизить осцилляции теплового потока, полученные из обработки выходного сигнала датчика.

Рост фронта теплового потока на двух других датчиках предположительно связан с излучением углекислого газа за отраженной ударной волной. Чтобы определить вклад радиационного теплового потока в полной тепловой поток требуется проведение дальнейших исследований и определение спектральной чувствительности данных датчиков. Как видно из

приведенных измерений датчик на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута менее восприимчив к радиационному тепловому потоку.

Выводы по Главе 2

Проведена калибровка всех датчиков теплового потока, использованных в работе. Определены их вольт-ваттные коэффициенты для последующего измерения конвективного теплового потока в экспериментах. Определена вольт-ваттная характеристика датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия в диапазоне длин волн 400-1150 нм. Установлено что свойства датчиков со временем деградируют и периодически требуется повторная калибровка.

Отрицательные значения теплового потока, полученные в одном из экспериментов по измерения теплового потока за отраженной ударной волной в ксеноне связаны с проникновением излучения ударно-нагретого газа в толщу датчика и заметному нагреву подложки, поэтому температурные градиенты могли быть инвертированы. Предположительно подобное поведение датчика связано с образованием плазмы. Появляется электропроводность, которая может влиять на измерения в ударной трубе.

В экспериментах с аргоном наблюдается хорошее совпадение результатов измерений, расчета и теории.

Эксперименты в углекислом газе показали влияние трехударной конфигурации на рост теплового потока, так как температура газа в ней значительно выше, чем в пристеночном слое то происходит увеличение теплового потока, что регистрируется в эксперименте и численном моделировании.

Измерения параметров за отраженной ударной волной в углекислом газе при одних и тех же параметрах тремя разными датчиками показали разный уровень измеренных тепловых потоков. Отличие фронта теплового потока на датчиках предположительно связан с излучением углекислого газа за отраженной ударной волной.

Заключение

В рамках работы проведены калибровки датчиков по отраженной ударной волне в средах азота и аргона. Установлено влияние используемых газов на значение полученного вольт-ваттного коэффициента. Установлена деградация свойств датчиков со временем и необходимость повторной калибровки перед экспериментами. Определены оптические характеристики датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия и влияние пленки на его быстродействие.

Проведены измерения тепловых потоков за отраженной ударной волной в средах ксенона, азота, углекислого газа. Установлено влияние ионизации на сигнал датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки хрома. Приведено сравнение влияния на фронт сигнала и тепловых потоков усилителей с разной полосой пропускания и коэффициентом усиления датчиков теплового потока на основе датчика теплового потока на основе единичного анизотропного термоэлемента из монокристалла висмута.

Определены оптические характеристики датчика на основе термоэлектрически анизотропной пленки из теллурида германия.

Список литературы

1. Kashif T. A., Subburaj J., Farooq A. On the flow characteristics in the shock formation region due to the diaphragm opening process in a shock tube //arXiv preprint arXiv:2501.13531. – 2025.
2. Rowe D. M. (ed.). Thermoelectrics handbook: macro to nano. – CRC press, 2018.
3. Sapozhnikov S. Z., Mityakov V. Y., Mityakov A. V. Heatmetry: the science and practice of heat flux measurement. – Springer Nature, 2020.
4. B. Birch, D. Buttsworth, F. Zander, Exp. Therm. Fluid Sci., 119, 110177 (2020). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110177
5. E. Marineau, H. Hornung, in Proceedings of 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting (AIAA, Orlando, Florida, 2009) AIAA 2009-737. DOI: 10.2514/6.2009-737
6. Fay J. A., Kemp N. H. Theory of heat transfer to a shock-tube end-wall from an ionized monatomic gas // Journal of Fluid Mechanics. – 1965. – Т. 21. – №. 4. – С. 659-672.
7. Cantera: An open-source suite for combustion, thermodynamics, and transport [Электронный ресурс] / D. G. Goodwin, H. K. Moffat, R. L. Speth [и др.]. – Версия 3.0.0. – 2023. – URL: <https://cantera.org> (дата обращения: 12.10.2023).
8. SDTtoolbox: Shock and Detonation Toolbox [Электронный ресурс]. – Версия 1.2. – 2021. – URL: <https://shepherd.caltech.edu> (дата обращения: 12.10.2023).
9. Kotov M. A. et al. Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity //Applied Thermal Engineering. – 2021. – Т. 195. – С. 117143.
10. Monakhov N. A., Sakharov V. A., Popov P. A. Heat flux measurements of high speed flow around an axisymmetric body using sensors based on anisotropic thermoelements. – 2023.

- 11.Chen Q. F. et al. Ionization and equation of state of dense xenon at high pressures and high temperatures //Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics. – 2009. – Т. 79. – №. 1. – С. 016409.
- 12.Weymann H. D. Precursors ahead of shock waves: I. Electron diffusion //The physics of Fluids. – 1969. – Т. 12. – №. 6. – С. 1193-1199.
- 13.Kim M., Gülhan A., Boyd I. D. Modeling of electron energy phenomena in hypersonic flows //Journal of thermophysics and heat transfer. – 2012. – Т. 26. – №. 2. – С. 244-257.
- 14.Gas Dynamics Toolkit (GDTk) [Электронный ресурс] / The University of Queensland, Centre for Hypersonics. – 2025. – URL: <https://gdtk.uqcloud.net/> (дата обращения: 14.04.2025).
- 15.Mark H. The interaction of a reflected shock wave with the boundary layer in a shock tube. – 1958. – №. NACA-TM-1418.