Комментарии к слайдам

- 1 Слайд Представляю доклад на тему **Термографическое исследование тепловых потоков на газодинамическом стенде**.
- 2 Слайл Цель работы заключалась в изучении тепловых явлений в ударной трубе посредством применения методики инфракрасной термографии. Исследовалось изменение температуры выделенных областей опроса при движении ударных волн в канале ударной трубы. Проводился анализ и сравнение с ранее полученными экспериментальными данными, а также с численными моделями. Bce эксперименты проводились В лаборатории плазменной газодинамики на однодиафрагменной ударной трубе сечением 24x48_{MM}. Варьированием начальных параметров достигалось изменение чисел Маха ударной волны в диапазоне от 1,4 до 3,5. На рисунке справа вы видите схематическое изображение установки. Установка состоит из 5 основных камер, однако, в данной работе основную роль будут играть две первые камеры: камера низкого давления (КНД), куда нагнетается толкающий газ гелий и камера высокого давления (КВД), подключенная к форвакуумному насосу. Ударная труба оборудована пьезоэлектрическими датчиками, подключенными к выходам осциллографа. Данная техническая реализация позволяет регистрировать прохождение ударной волны, а также оценивать её скорость. Для панорамной регистрации тепловых полей используется тепловизионная камера FLIR SC7700, работающая в средневолновом ИК-диапазоне 3,7-4,8 мкм.
- 3 Слайд Обратимся к теории. Ударная волна — это сильное нелинейное возмущение в сжимаемой сплошной среде, движущееся относительно этой среды со сверхзвуковой скоростью. Это возмущение, также называемое поверхностью котором терпят разрыв основные макроскопические разрыва, термодинамические параметры: температура Т, давление Р и плотность. Данный переход невероятно скоротечен (**порядка** 10^{-6} секунд). Скорость и интенсивность ударной волны характеризуется числом Маха, равным отношению скорости потока газа к местной скорости звука. Скачкообразное изменение макроскопических термодинамических параметров на поверхности разрыва (фронте ударной волны) есть функция от числа Маха ударной волны. Доопределив законы сохранения импульса, массы и энергии уравнениями состояния газа и энтальпии можно получить уравнения Ранкина – Гюгонио для изменения макроскопических термодинамических параметров при прохождении через фронт УВ. Данные уравнения представлены внизу слайда. Справа на слайде представлена схема течения ударных волн и частиц соответственно. Х - t диаграмма подробно изображает характер течения, а также совокупность газодинамических эффектов, происходящих в ударной трубе. Особенно нас интересуют выделенные временна t_1 и t_2 , на которых происходит прохождение УВ по каналу УТ с изменением ТД параметров согласно уравнениям Ранкина – Гюгонио, а также взаимодействие отраженной волны с контактной поверхностью и дальнейшее многократное отражение затухающих УВ соответственно.
- 4 Слайд Как уже было сказано, методика, используемая для регистрации изменений ТД параметров в данной работе, носит название инфракрасная

термография. ИК термография – это наука использования электроннооптических устройство для регистрации и измерения излучения и сопоставления его с температурой поверхностей. ИК-термография обладает безусловными преимуществами в такого рода исследованиях: она является бесконтактной технологией, что позволяет регистрировать температурные поля удалённых источников, а также возможность мгновенно получать полноценные двухмерные температурные поля. В её основу положен эффект излучения энергии в форме радиации для всех тел с положительной абсолютной температурой. Такое излучение возникает в твердых телах, жидкостях и газах вследствие колебаний атомов в кристаллической решетке или вращательно-колебательного движения молекул. Излучение реального тела подчиняется Планковскому спектральному закону, помноженному на спектральный коэффициент излучения, равный отношению излучения реального тела $I(\lambda)$ к излучению модели чёрного тела в полусферу $I^b(\lambda)$. Инфракрасный диапазон электромагнитного спектра охватывает 0.74 - 14 мкм длины волн. И разделяется на 5 подгрупп, показанных на рисунке справа.

- 5 Слайд На двухкамерной ударной трубе в лаборатории плазменной газодинамики были реализованы две конфигурации снятия тепловизионных данных. В первой серии экспериментов исследована динамика нагрева боковой стенки ударной трубы после прохождения ударной волны. Тепловизор был установлен перпендикулярно главной оси трубы (на рисунке справа). Для данной конфигурации областью опроса являлись нанесенные на боковую поверхность трубы различные материалы: черная широкая изолента (зеленым цветом), белого цвета (оранжевым малярный скотч цветом), слой фломастера (серым цветом) слой черной матовой аэрозольной краски (синим цветом), также рассматривается голая поверхность медной трубы (белым цветом). В эксперименте использовались различные материалы диафрагмы, а также варьировались начальные давления для достижения различных чисел Maxa.
- 6 Слайл Оценивается время изменения температуры после прохождения ударной волны по каналу трубы, количественное изменение температуры как положительного (для аэрозоля и фломастера), так и отрицательного для всех материалов. Ввиду различных коэффициентов теплопроводности временные и температурные параметры для различных областей опроса разнятся. Тот факт, что начальная температура металла и белого малярного скотча несколько выше других материалов, объясняется необходимостью внесения поправок в тепловизионные данные, ввиду большего коэффициента отражения незатемненных материалов. При прохождении ударной волны по каналу тепловизором регистрируется как положительные, так и отрицательные изменения температуры области опроса. На рисунке слева представлено сравнение классической X – t диаграммы в терминах температуры с экспериментальными полученными температурными развертками на аэрозоле. Прослеживается достаточное сходство отрицательного изменения температуры на полученной развертке с теоретическим переходом 1-2.
- 7 Слайд На данном слайде представлены графики зависимостей, полученных в ходе обработке экспериментальных данных. Первый график (слева) отражает

зависимость отрицательного изменение температуры от числа Маха, для которого проводился сравнительный анализ на предыдущем слайде. Такой картине соответствует эффект, когда нагретый и сжатый спутный поток, идущий за ударным фронтом ударной волны, замыкается контактной поверхностью, разделяющей рабочий и толкающий газы. Это изменение, наблюдаемое во всех областях опроса, обладает зависимостью от числа Маха представленное на графике. Заметно, что изменение температуры пропорционально увеличению числа Маха, начиная с М = 2,2. До этого же поведение зависимости обратное. Второй график (справа) показывает, как в зависимости от числа Маха меняется время отрицательного падения, абсолютное изменение которого представлено на первом графике. Данный график призван иллюстрировать, как меняются коэффициенты температуропроводности различных областей опроса от входящих различных температурных возмущений. Сильные пики до Маха 2,2 характеризуются вынужденным увеличением давления в камере низкого давления, а соответственно процесс формирования ударной волны уже не будет аналогичен изначальному, когда давление понижалось до минимальных значений, реализуемых форвакуумным насосом.

- 8 Слайд Во второй серии экспериментов исследована динамика нагрева торцевой стенки ударной трубы после отражения ударной волны. Тепловизор был установлен под небольшим углом относительно главной оси ударной трубы. Для данной конфигурации областью опроса являлся торец камеры низкого давления, при отстыкованной разрядной камере и вмонтированной тонкой (0,25 мм) пластинке из нержавеющей стали (область опроса выделена зеленым цветом). Также был реализован ненулевой угол для тепловизора для обеспечения безопасности. В камеру высокого давления, как и прежде, нагнетается толкающий газ гелий, однако, из-за отстыкованного форвакуумного насоса на конце КНД, давление не понижалось и было равно атмосферному. Также исследования велись для относительно низких чисел Маха ударной волны, опять же в целях обеспечения безопасности.
- 9 Слайд Так как при данной конфигурации установки, камера низкого давления наглухо закрыта металлической вставкой, ударная волна нормально отражается от плоского торца и уже вторично нагревает и сжимает спутный поток. Такой процесс оставляет газ покоящимся относительно стенок ударной трубы и носит название двойного ударного сжатия. Для начального числа Маха (М = 1,5) температура "пробки" изменяется до 392 К, а за отраженной ударной волной температура газа поднимется практически до 500 К. Однако в виду теплопроводности металла изменение, регистрируемое с другой стороны тепловизором, не превышает 5 градусов. Данное изменение показано на рисунке слева. Для данного процесса также был проведён численный анализ отражения ударной волны от торца УТ и получены значения изменения температуры газа в пристеночной области (торцевой) трубы (Доцет Иванов И.Э.). На рисунке справа трём кривым соответствуют численный расчёт температуры газа в пристеночной области (черным цветом), усреднение численного расчета (красным цветом) и экспериментально полученные значения температуры тепловизором FLIR с металлического торца УТ (синим). Отставание экстремумов температуры,

определяющие максимумы температур, характеризуется теплопроводностью металлической пластинки и составляет **1.2** секунды.

10 Слайд Результаты проведенной работы показаны на слайде: показано, что инфракрасная термография является подходящей, с экспериментальной точки зрения, для исследования ударно-волновых процессов в газах при регистрации тепловых потоков со стенок. ИК-термография показала свою неоспоримую способность, с поправкой на теплопроводность металлов, отражать даже небольшие температурные изменения в широком диапазоне частоты съемки. В результате обработки и анализа экспериментальных данных были получены термографические развертки по времени тепловых потоков от проходящих и отраженных от торца ударных волн. Выявлены определенные зависимости температурных и временных параметров от чисел Маха. Проведены сравнения с соответствующими численными оценками.