

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

**ТЕРМОГРАФИЧЕСКОЕ
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ
ПОТОКОВ НА
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ СТЕНДЕ**

Кафедра Молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества

Выполнил студент 404 группы

Муратов Мурат Ильмдарович

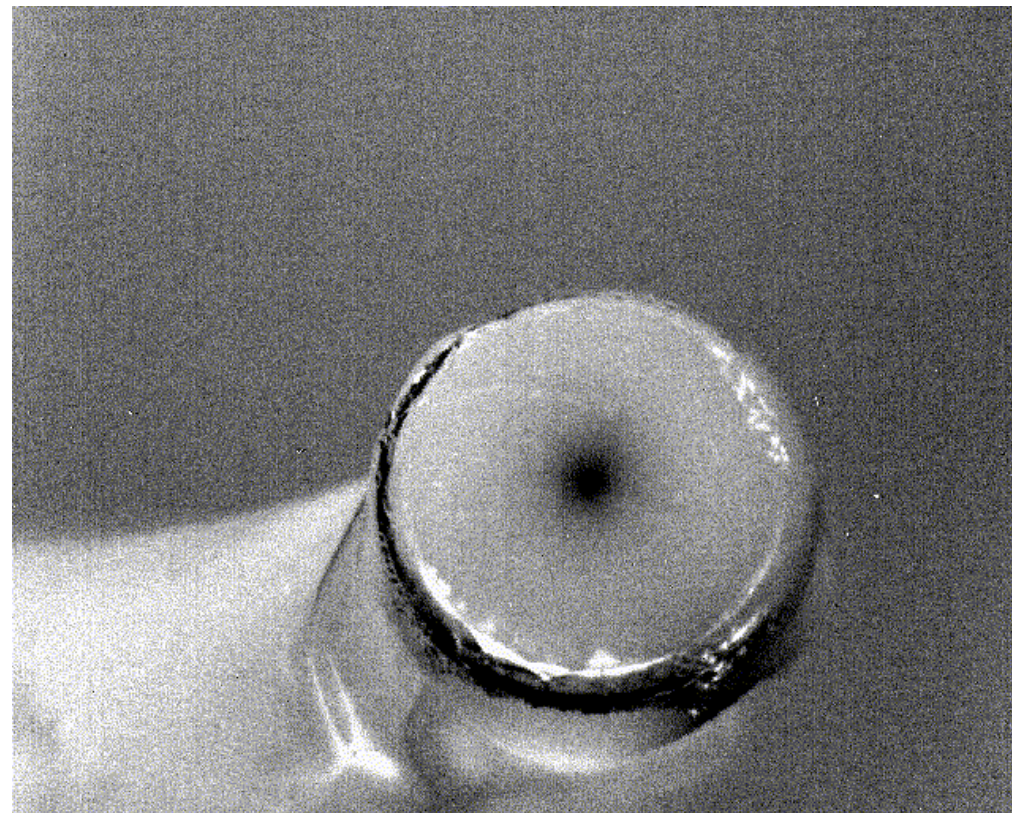
Научный руководитель

Д.Ф.-М.Н., Знаменская Ирина Александровна

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение тепловых явлений в однодиафрагменной ударной трубе сечением 24x48мм посредством применения инфракрасной термографии.

Исследование изменения температуры выделенных областей опроса при движении ударных волн в канале ударной трубы в широком диапазоне чисел Маха [1,4; 3,5].



Интегральный эффект Джоуля-Томсона, полученный на установке УТРО - 3

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

Ударная волна — это сильное нелинейное возмущение в сжимаемой сплошной среде, движущееся относительно этой среды со сверхзвуковой скоростью. Это возмущение, также называемое поверхностью разрыва, на котором терпят разрыв основные макроскопические термодинамические параметры: температура T , давление P и плотность ρ . На поверхности разрыва обязательно выполняются граничные условия:

$$[\rho v_x] = 0, \left[\frac{v_x^2}{2} + h \right] = 0, [p + \rho v_x^2] = 0$$

где $v_x = v_n - u$ - скорость движения газа относительно поверхности разрыва, а v_n и u - нормаль к поверхности скорость газа и скорость самой поверхности соответственно. Данный скачок невероятно скоротечен $t = 10^{-6}$ с. Скорость и интенсивность ударной волны характеризует число Маха

$$M = u/c$$

где c - местная скорость звука.

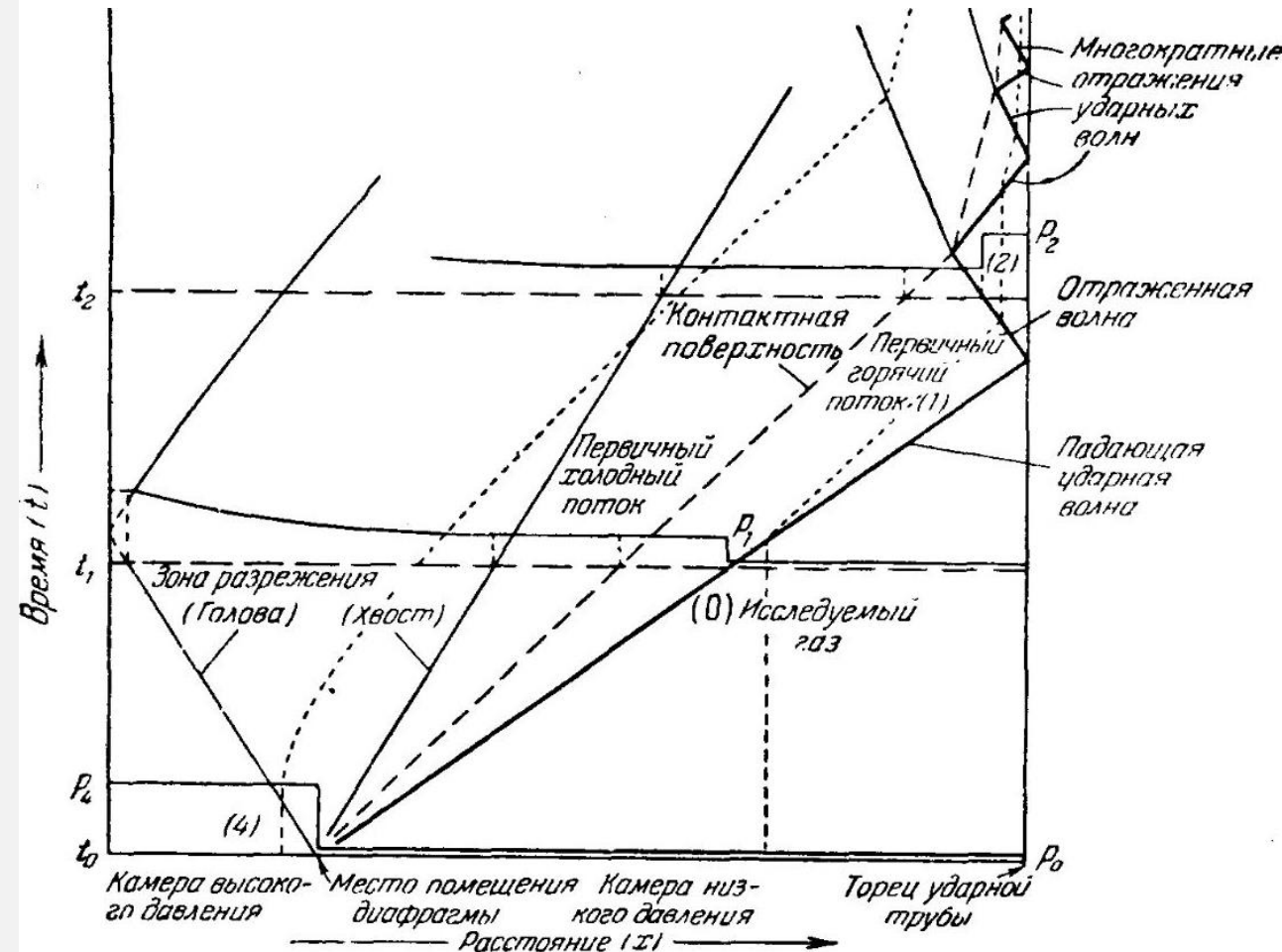
ТЕЧЕНИЕ В УДАРНОЙ ТРУБЕ

Скачок термодинамических параметров:
температура T , давление P и плотность ρ .

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2}$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{2}{(\gamma + 1)M^2} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right)$$



X - t диаграмма течения в ударной трубе

ИНФРАКРАСНАЯ ТЕРМОГРАФИЯ

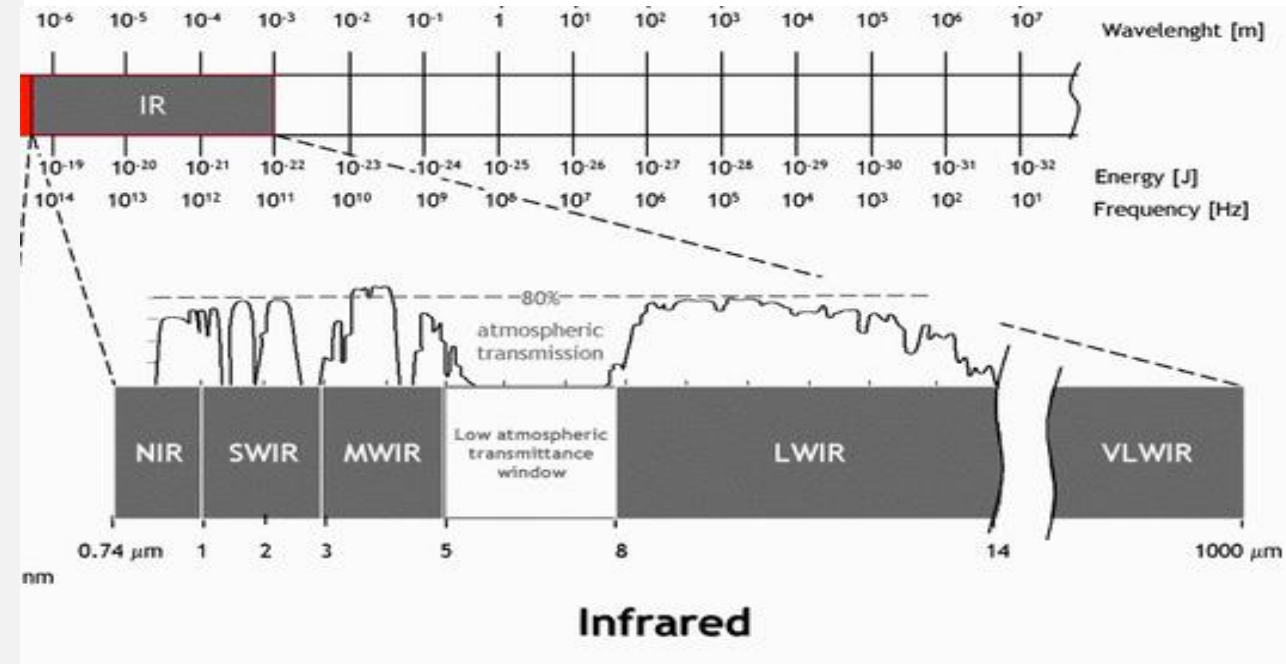
Бесконтактная неразрушающая технология регистрации двумерных температурных полей удалённых источников.

Инфракрасный диапазон электромагнитного спектра **0.74 - 1000 мкм**.

В основу положен эффект излучения энергии в форме радиации для всех тел с положительной абсолютной температурой.

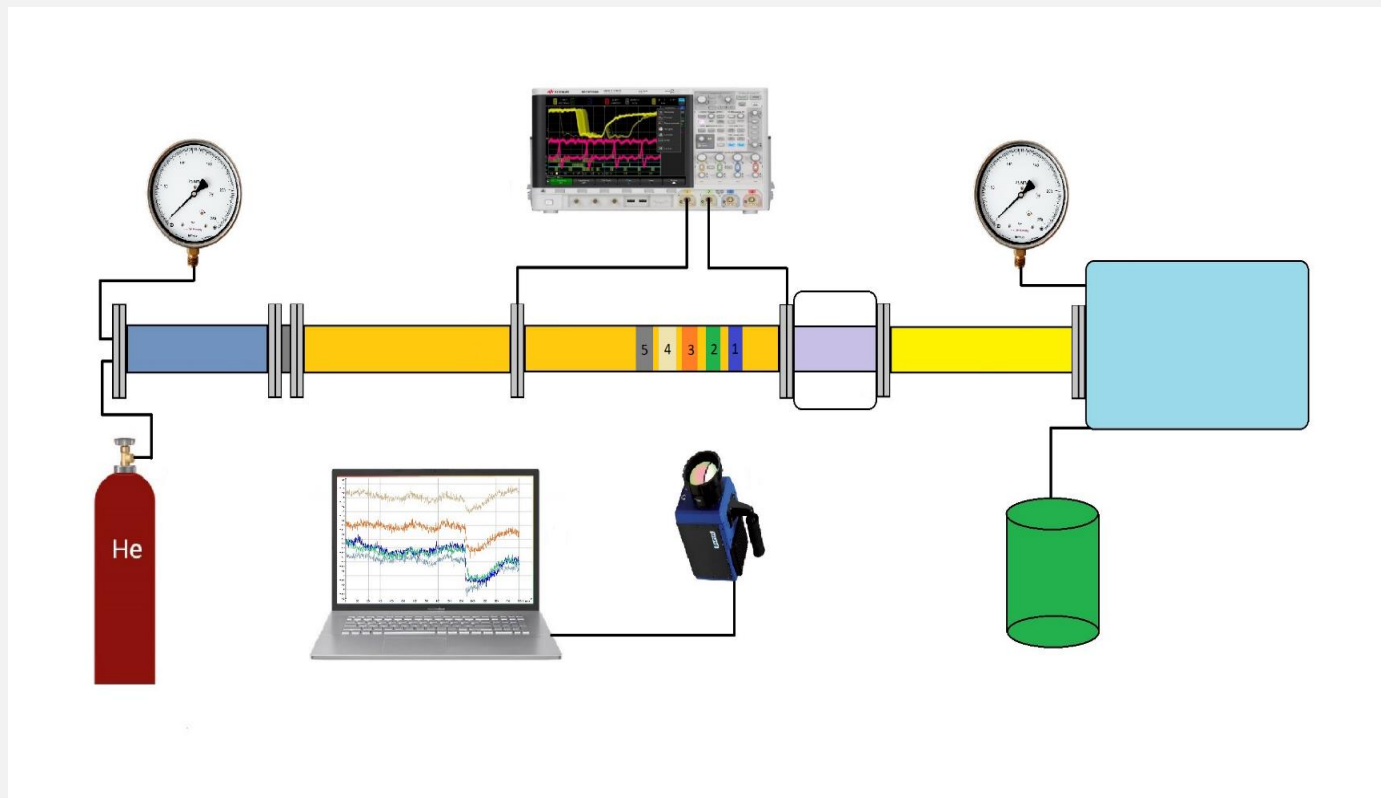
$$I(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

где C_1 и C_2 – универсальные радиационные константы, $\varepsilon(\lambda)$ - спектральный коэффициент излучения.

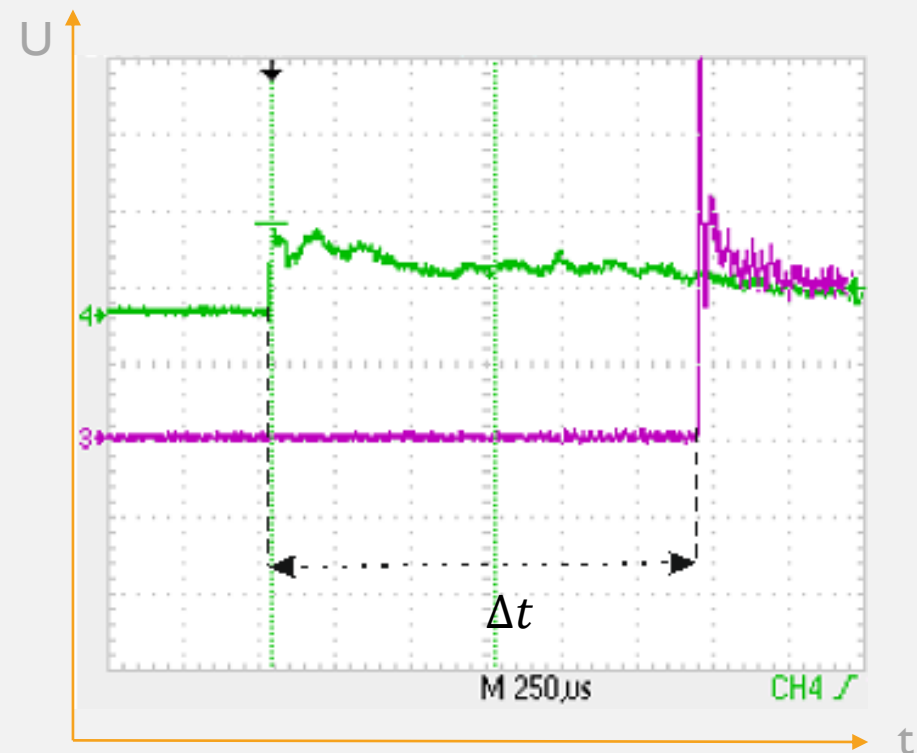


Инфракрасный спектр

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



Экспериментальная установка
и область исследования (первая конфигурация)



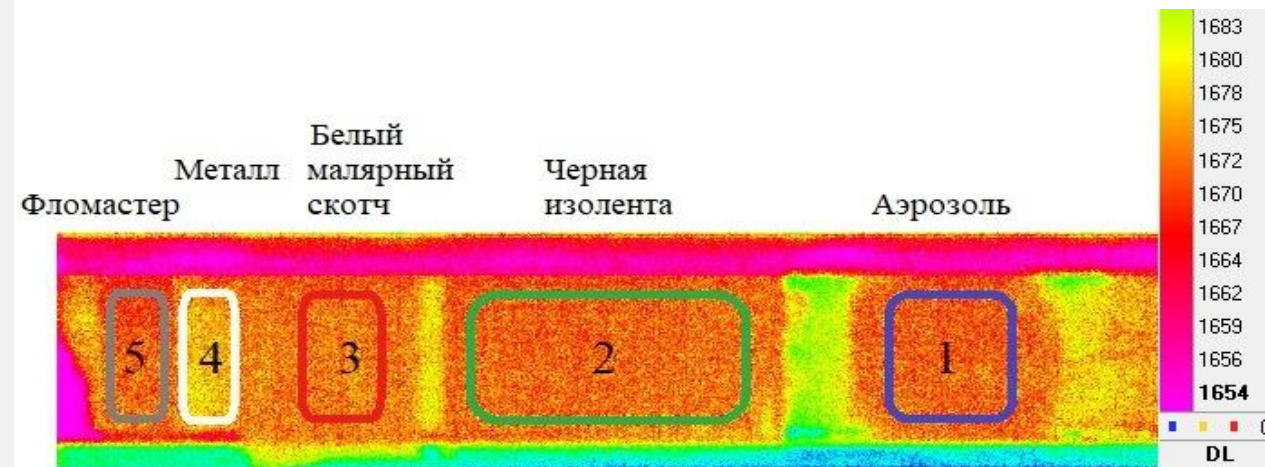
Осциллограмма давления на стенке ударной
трубы при прохождении ударной волны.

ТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ БОКОВОЙ СТЕНКИ

В первой серии экспериментов исследована динамика нагрева боковой стенки ударной трубы после прохождения ударной волны. Тепловизор был установлен перпендикулярно главной оси трубы.

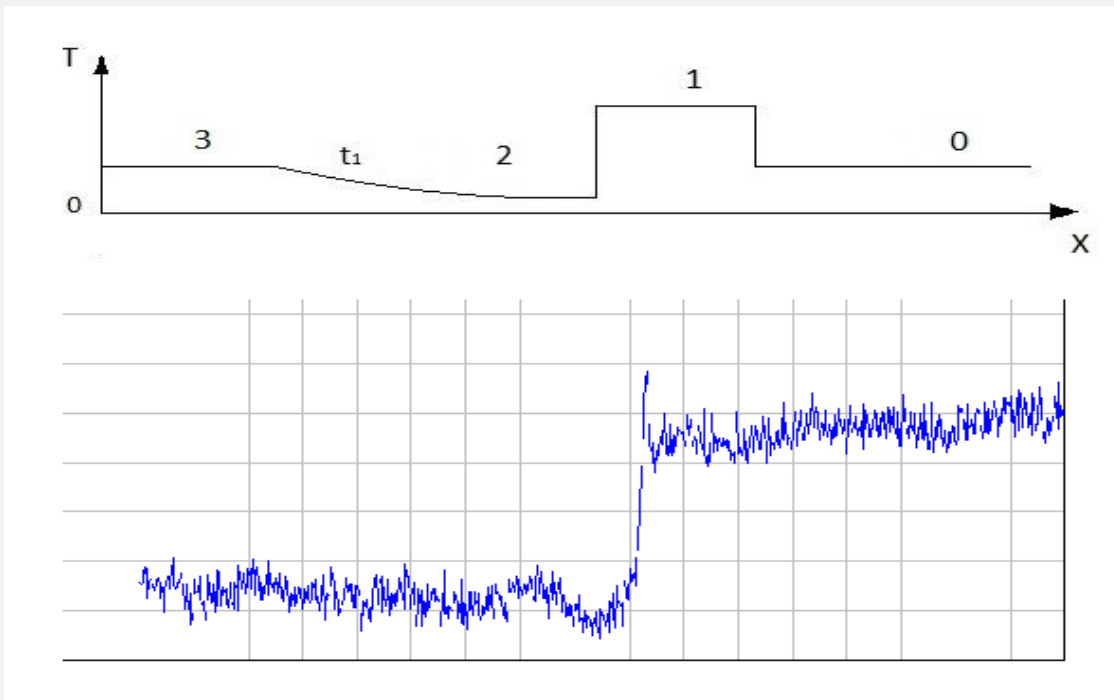
Для панорамной регистрации тепловых полей использовалась тепловизионная камера FLIR SC7700, работающая в средневолновом ИК-диапазоне 3.7-4.8 мкм.

Областью опроса являлись нанесенные на боковую поверхность трубы материалы с различным коэффициентом излучения.



Термограмма с выделенными областями опроса

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ



Профиль температуры в ударной трубе [$X - t$ диаграмма] (сверху), экспериментальный график эволюции температуры в точке в области аэрозоли (снизу)

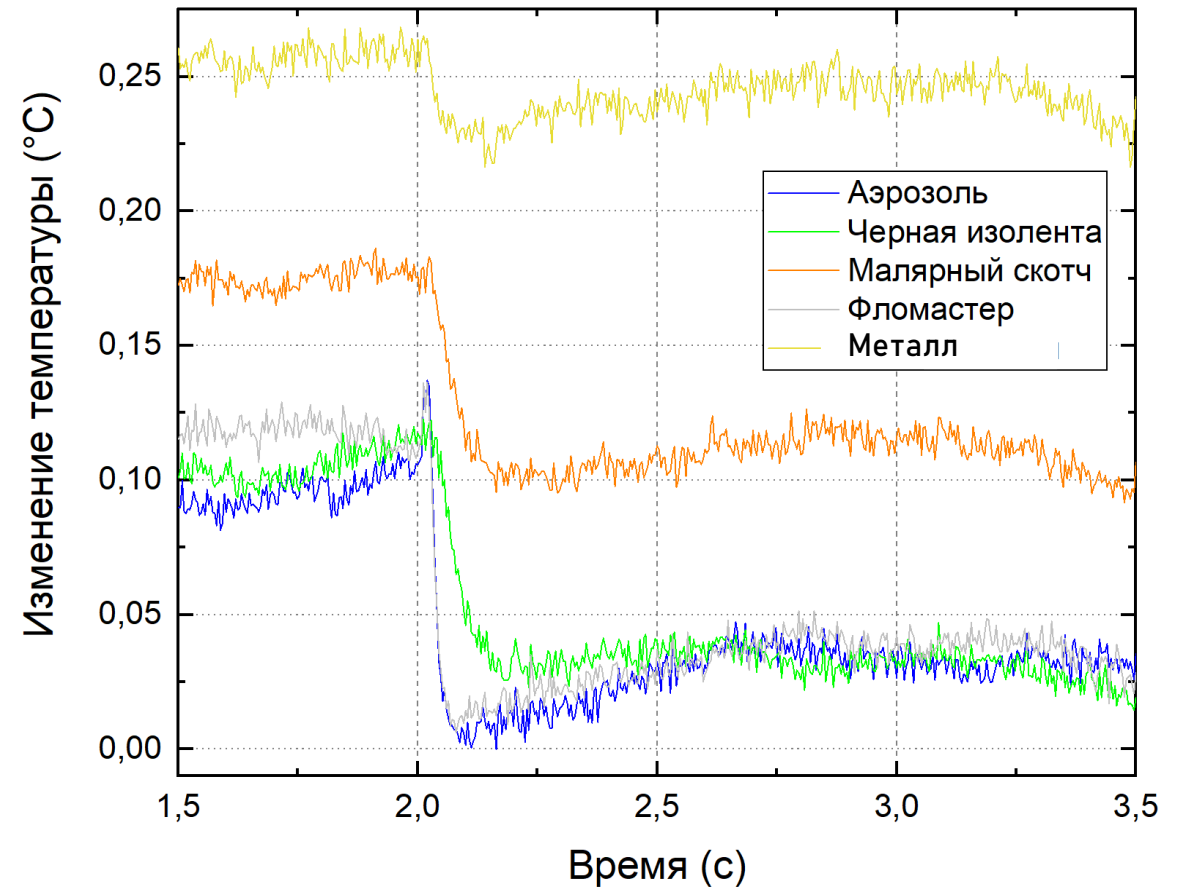


График изменения температуры для всех областей опроса для числа Маха 3,5. Частота съемки 250 Гц.

ГРАФИКИ

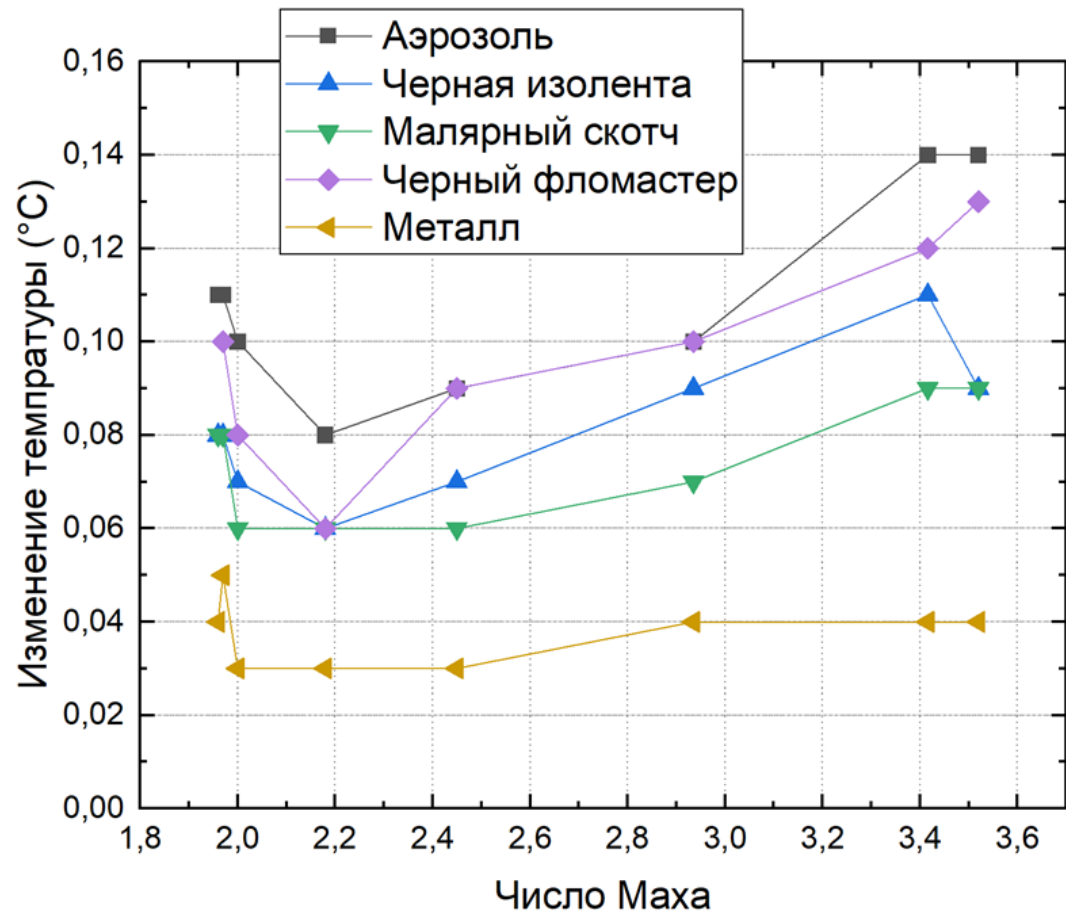


График зависимости относительного изменения температуры от числа Маха

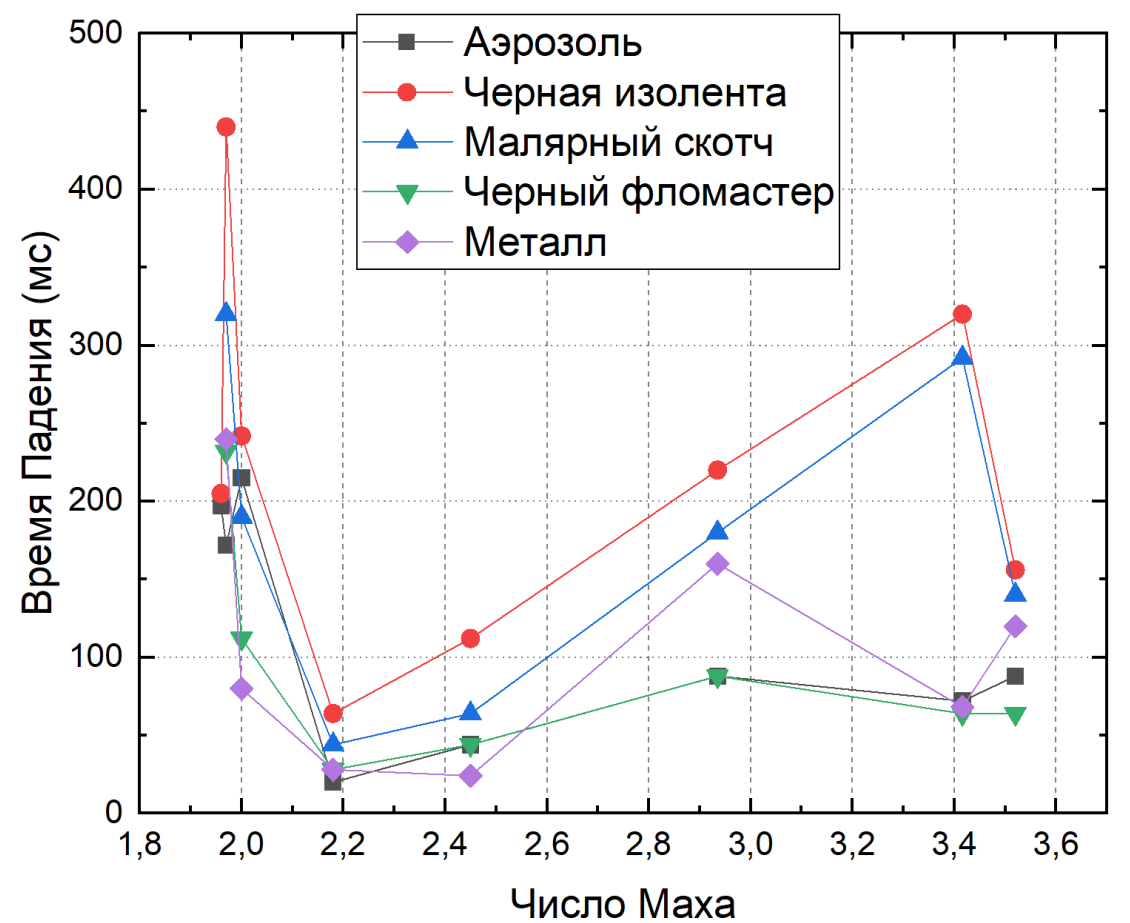
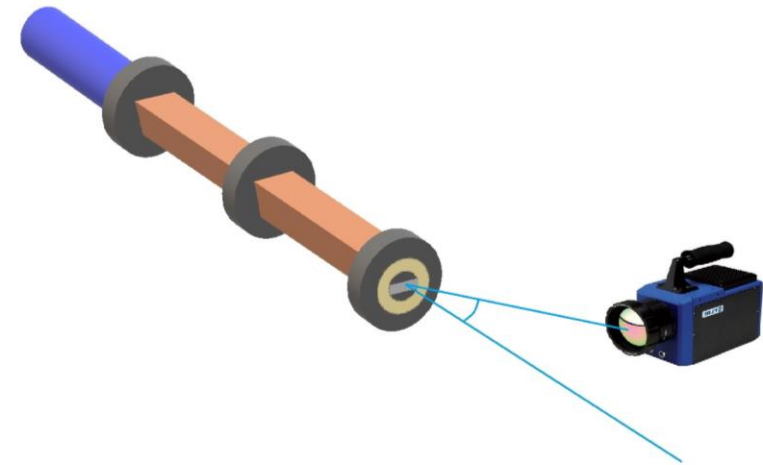


График зависимости времени отрицательного изменения температуры от числа Маха

ИЗЛУЧЕНИЕ ИЗ ТОРЦЕВОЙ СТЕНКИ

Во второй конфигурации областью опроса являлся торец КНД, при отстыкованной разрядной камере и вмонтированной тонкой (0,25 мм) пластинке из нержавеющей стали (область опроса выделена зеленым цветом). Ненулевой угол для тепловизора был необходим для обеспечения безопасности.

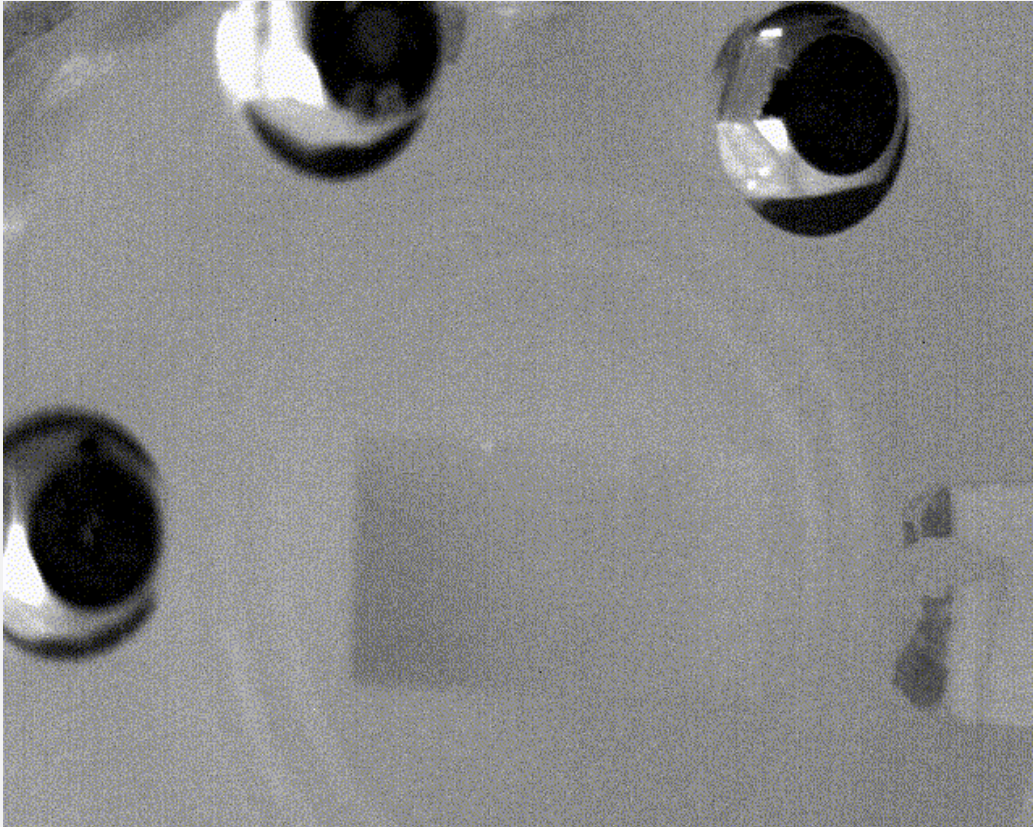


Экспериментальная установка
во второй конфигурации



Область опроса

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ИЗ ТОРЦА



Анимация изменения температуры
области опроса

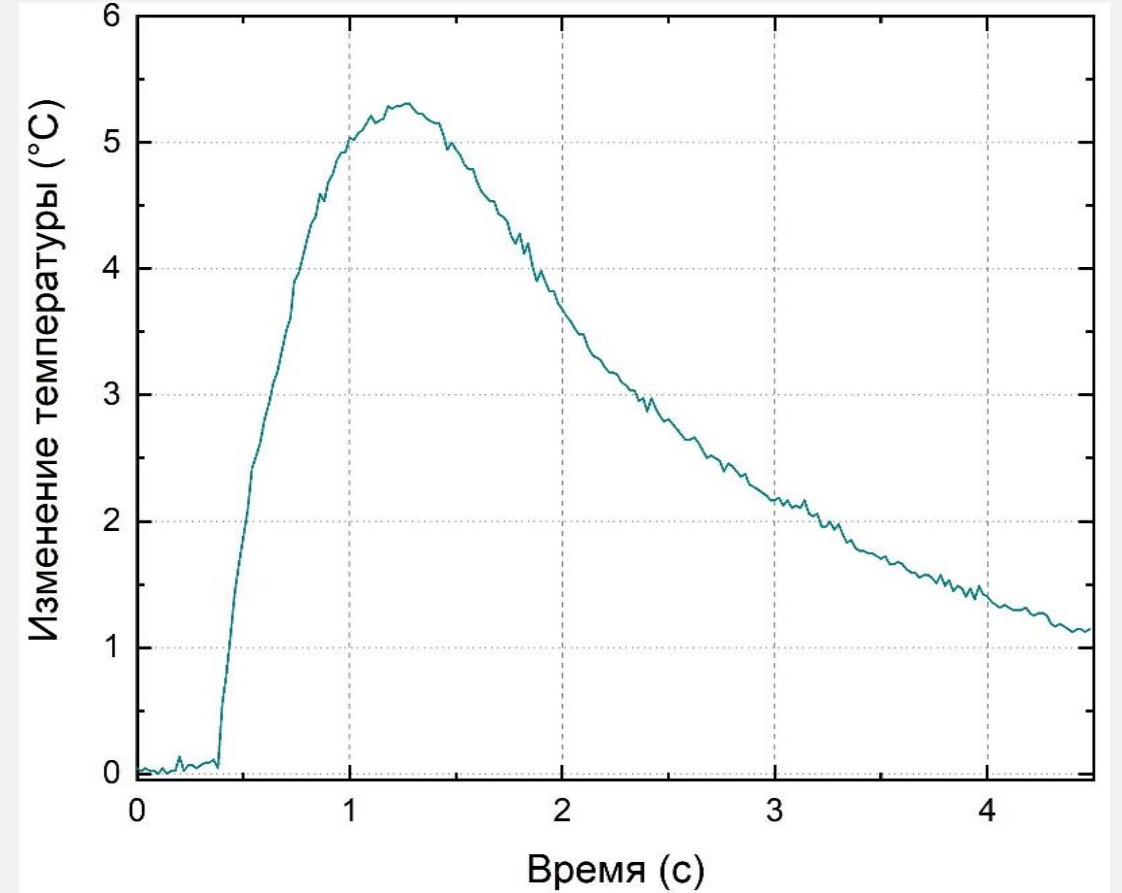


График изменения температуры на торце
при числе Маха 2,5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Трём кривым соответствуют численный расчёт температуры газа в пристеночной области (черным цветом), усреднение численного расчета (красным цветом) и экспериментально полученные значения температуры тепловизором с металлического торца УТ (синим).

Отставание экстремумов температуры, определяющее максимумы температур, характеризует теплопроводность металлической пластинки и составляет 1.2 секунды.

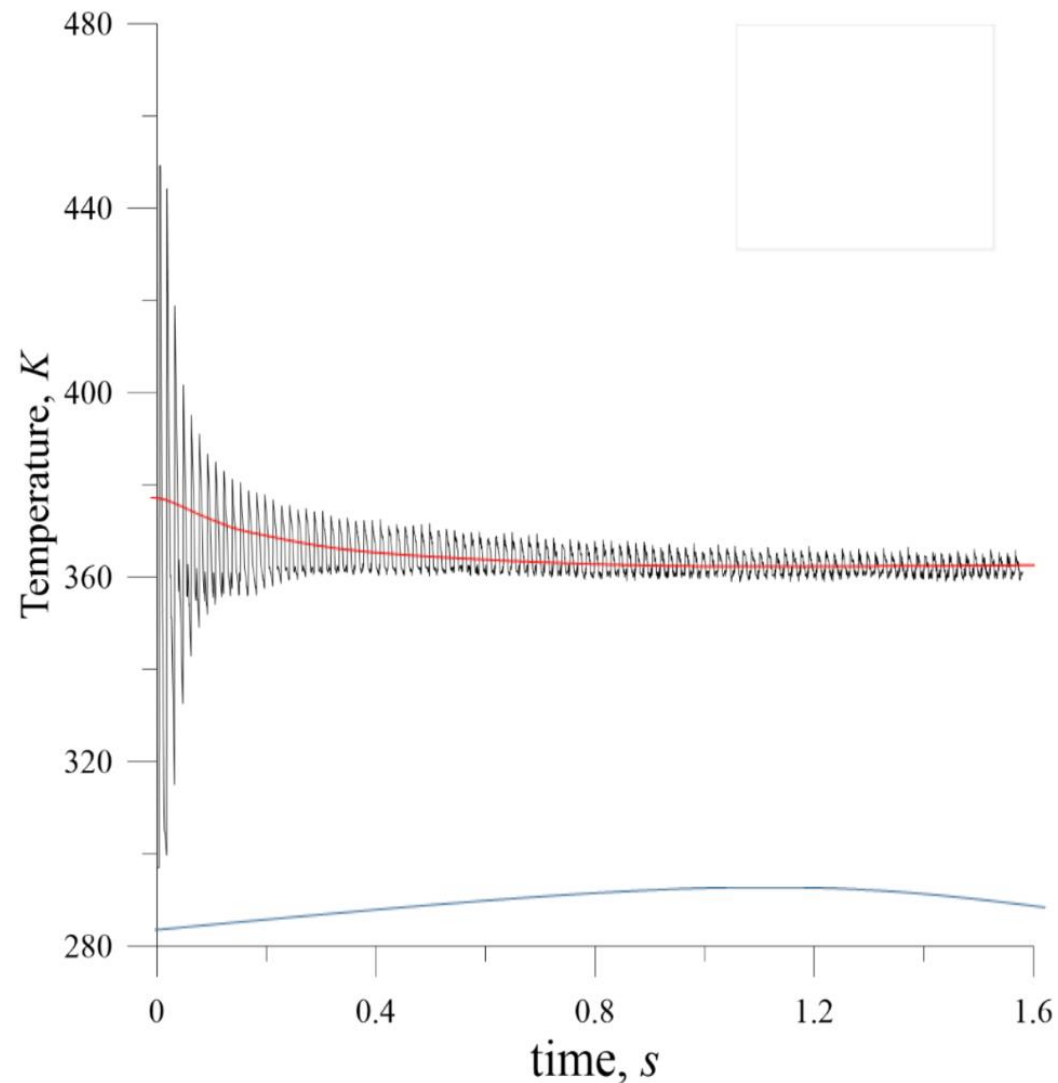


График изменения температуры в пристеночной области

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

- Показано, что инфракрасная термография позволяет проводить исследования тепловых процессов в канале и стенках ударно-волновых установок. ИК-термография позволяет отражать пространственно-временные характеристики температурных изменений.
- Получены термографические развертки тепловых потоков от проходящих по каналу и отраженных от торца ударной трубы ударных волн. Показано, что минимальное регистрируемое тепловизором время нарастания теплового потока из стенки за проходящей ударной волной – около 10 миллисекунд. Максимальное зарегистрированное при отражении ударной волны изменение температуры – 5 градусов.
- Выявлены определенные зависимости температурных и временных параметров термограмм от чисел Маха в диапазоне 1.5-3.5 (температуры газа за ударной волной) и материала покрытия.
- Проведены сравнения с соответствующими численными оценками динамических параметров в ударной трубе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 736.
- Селиванов В.В., Соловьев В.С., Сысоев Н.Н.* Ударные и детонационные волны – М.: Изд-во МГУ, 1990. – 256 с.
- Мурсенкова И.В., Сысоев Н.Н., Уваров А.В.* Основы физической гидродинамики – М.: Физический факультет МГУ, 2015. – 132 с.
- Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г.* Нестационарные взаимодействия ударных волн – М.: Наука, 1977. – 274 с.
- Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений – М.: Наука, 1968. – 688 с.
- Robert W. Fox, Alan T. McDonald,* Introduction To Fluid Mechanics Fourth Edition, ISBN 0-471-54852-9
- Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль - М.: Издательский дом Спектр, 2-е издание, 2013. – 544 с.
- Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979, 416 с.
- Giovanni Maria Carlomagno, Gennaro Cardone* Infrared thermography for convective heat transfer measurements // Exp. Fluids. 2010 49:1187-1218
- Leontiev A.I., Kiselev N.A., Burtsev S.A., и др.* Experimental investigation of heat transfer and drag on surfaces with spherical dimples// Exp. Therm. Fluid Sci. 2016. 79. P. 74–84
- Carson L. Runninga, Thomas J. Julianoa, Joseph S. Jewellb, Matthew P. Borgb, Roger L. Kimmelb, Roghelia, H.Olivier, I. Egorov, P. Chuvakhov,* Experimental investigation of Gortler vortices in hypersonic ramp flows, Exp. Fluids 58 (2017)
- Знаменская И.А., Шагиянова А.М., Коротеева Е.Ю., Муратов М.И., Рязанов П.А.,* Анализ больших массивов данных при визуализации динамических тепловых полей (в печати).