

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Имени М.В.Ломоносова

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра молекулярных процессов и экстремального состояния вещества

Термографическое исследование тепловых потоков на
газодинамическом стенде

Доклад

Студента четвертого курса Муратова М.И.

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук Знаменская И.А.

Москва

2020г.

Введение

Изучение и попытки обоснования различных явлений и процессов в газах и жидкостях всегда занимало особое место в науке. Ввиду обилия различных параметров таких систем: геометрические размеры и формы, скорость, концентрация частиц, наличие диффузии, вязкости, сжимаемости, да и разнообразие самих исследуемых систем - анализ, систематизация и изучение явлений является сложнейшей фундаментальной научной задачей. Не стоит забывать и о нелинейности основных уравнений гидро- и газодинамики, которые делают практически невозможным, за исключением особых случаев, прямого их исследования в разрыве с эмпирическими исследованиями. В данной работе рассматривается ударно-волновой процесс, реализующийся при течении газов в сверхзвуковом режиме. Ударная волна вносит существенные изменения в состояния среды, обладает многими «экстремальными» характеристиками и требует специальных технических реализаций для изучения и анализа. В данной работе термография использована для исследования изменения тепловых потоков в стенке прямоугольного канала ударной трубы. Исследована динамика нагрева боковой и торцевой стенки ударной трубы после прохождения ударной волны.

Литературный обзор

Ударная волна — это сильное нелинейное возмущение в сжимаемой сплошной среде, движущееся относительно этой среды со сверхзвуковой скоростью. Это возмущение, на котором терпят разрыв основные макроскопические термодинамические параметры: температура T , давление P и плотность ρ . Данный переход скоротечен (порядка 10^{-6} секунд) и сопровождается давлениями в миллионы паскалей, температурами в тысячи градусов и скоростями в тысячи метров в секунду. Скорость и интенсивность ударной волны характеризуется числом Маха $M = v/c$, равным отношению скорости потока газа к местной скорости звука. Фронт ударной волны является поверхностью разрыва термодинамических параметров. Скачок этих параметров есть функция числа Маха ударной волны и значения $\gamma = c_p/c_v$. Параметры однородного потока за плоской ударной волной вытекают из законов сохранения энергии и определяются соотношениями Ранкина-Гюгонио:

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \quad (1.1)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2} \quad (1.2)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1} M^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \left(\frac{2}{(\gamma + 1)M^2} + \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) \quad (1.3)$$

Процесс формирования и эволюции ударной волны в газодинамических ударных трубах протекает сложно и далеко не мгновенно. Это обуславливается достаточно медленным разрывом диафрагмы между камерами высокого и низкого давлений, релаксационными процессами в газе за фронтом УВ, вязкостью, а также теплопроводностью среды. Идеализированная схема течения в ударной трубе может быть представлена в виде $X - t$ диаграммы [Рис. 1].

Для изучения таких экстремальных явлений, конечно же, требуются специальные экспериментальные методики и их технические реализации. Используются датчики давления, методы высокоскоростной визуализации в оптическом диапазоне.

В данной работе для исследования тепловых потоков, проникающих через стенки ударной трубы было предложено использовать инфракрасную термографию. Излучение тела, принимаемое тепловизором может быть измерено экспериментально с высоким пространственным разрешением и временным разрешением 1/100 секунды. Этого, однако, недостаточно для разрешения скачка температуры на ударной волне.

Измерялся нагрев стенки в результате теплопроводности при прохождении теплового импульса через стенку; измерения проводились с наружной поверхности канала.

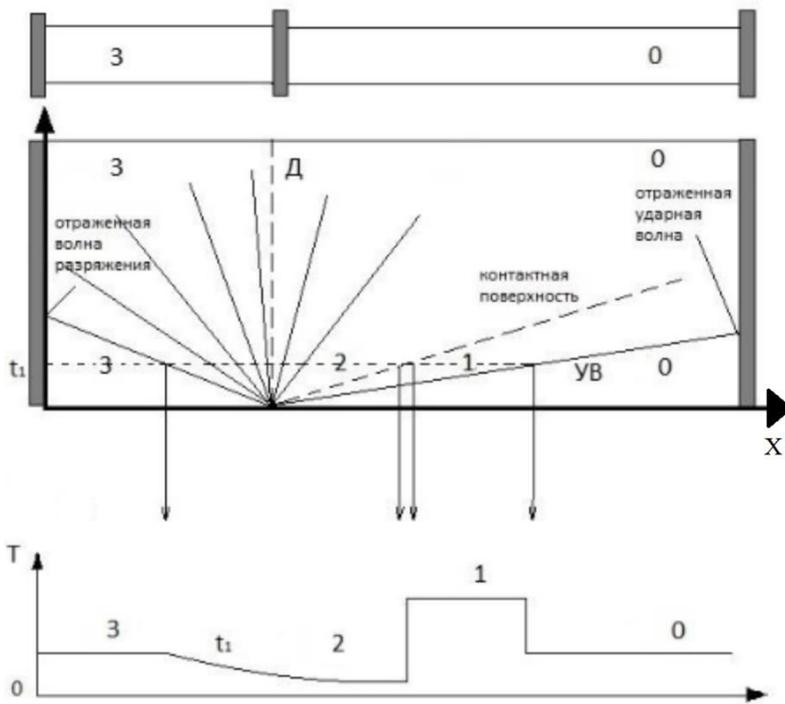


Рис. 1 Идеализированная схема течения в ударной трубе

Эксперимент

Цель работы заключалась в исследовании изменений температуры выделенных областей опроса при движении ударных волн в канале ударной трубы сечением 24x48мм. Все эксперименты проводились в лаборатории плазменной газодинамики на однодиафрагменной ударной трубе. Труба разделяется на две секции: камера высокого давления (далее КВД) и камера низкого давления (далее КНД). Варьированием начальных параметров достигалось изменение чисел Маха ударной волны от 2 до 3,5 включительно. Для панорамной регистрации тепловых полей использовалась тепловизионная камера FLIR SC7700, работающая в средневолновом ИК-диапазоне 3.7-4.8 мкм. Были реализованы две конфигурации снятия тепловизионных данных.

Излучение из боковой стенки

В первой серии экспериментов исследована динамика нагрева боковой стенки ударной трубы после прохождения УВ. Тепловизор был установлен перпендикулярно главной оси ударной трубы [Рис. 2] и рассматривалась область вертикальной стенки трубы во второй подсекции камеры низкого давления на расстоянии 135 см от диафрагмы. Областью опроса являлись нанесенные на боковую поверхность трубы различные материалы: черная широкая изолента, малярный скотч белого цвета, слой черного фломастера, слой черной матовой аэрозольной краски, также рассматривается голая поверхность медной трубы. После прохождения УВ тепловизором регистрируется изменение излучения с боковой плоскости канала ударной трубы (областей опроса). Температурная развёртка для УВ с Махом 3,4 представлена на [Рис. 3 слева].

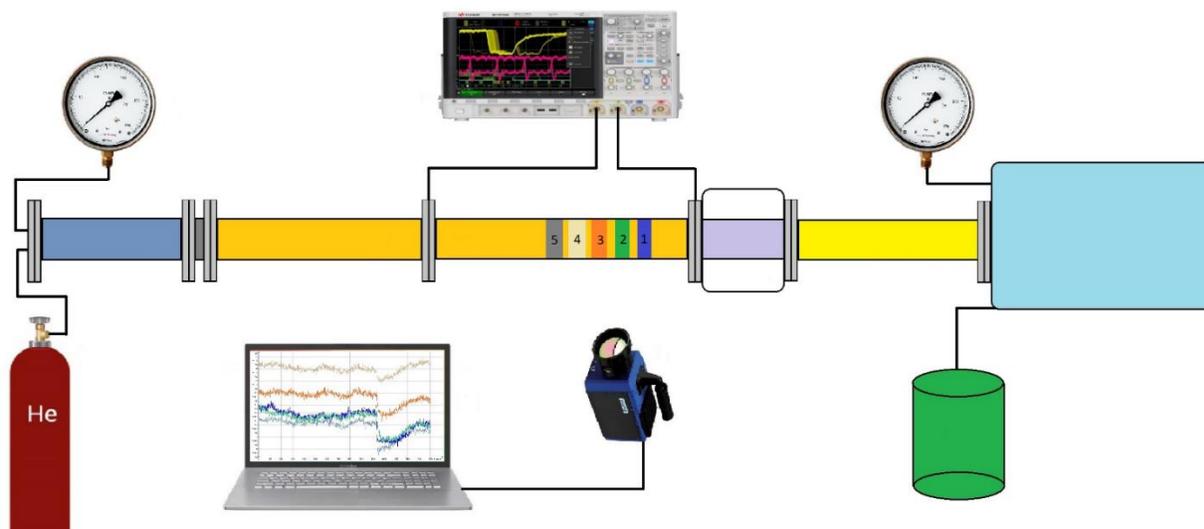


Рис. 2 Схема установки для первой конфигурации. Нанесенным областям опроса соответствуют: синий - черная матовая аэрозольная краска, зеленый - черная изолента, оранжевый - белый малярный скотч, бежевый - голая поверхность медной трубы, серый - слой чёрного фломастера.

Такое скачкообразное изменение температуры отвечает сложным газодинамическим процессам, проходящим внутри ударной трубы. Идущая по камере низкого давления ударная волна нагревает и сжимает рабочий газ за собой, образуя так называемую “пробку”. Изменённые параметры газа за фронтом ударной волны, а именно: температура, давление и плотность оцениваются по уже известным нам соотношениям Ранкина – Гюгонио (1.1-1.3).

Ввиду различных коэффициентов теплопроводности временные и температурные развёртки для различных областей опроса, с некоторой долей очевидности, разнятся. Тот факт, что начальная температура голого металла и белого малярного скотча несколько выше других материалов, объясняется необходимостью внесения поправок в тепловизионные данные, ввиду большего коэффициента отражения незатемненных материалов. Также толщина отдельных материалов: черной изоленты и малярного скотча не позволяет регистрировать скачкообразное изменение температуры вверх. В то время как, изменение температуры на аэрозоле и фломастере позволяет провести аналогии с классической $X - t$ диаграммой [Рис. 1 нижняя часть] решения уравнений Ранкина – Гюгонио для цилиндрической ударной трубы. Как было сказано выше, при прохождении ударной волны по каналу тепловизором регистрируется как положительные, так и отрицательные изменения температуры области опроса. Можно предположить, что отрицательному изменению температуры на [Рис. 3 слева] соответствует переход 1- 2 на классической $X - t$ диаграмме в терминах температуры [Рис. 1 нижняя часть], когда нагретый и сжатый спутный поток, идущий за ударным фронтом ударной волны, замыкается контактной поверхностью, которая разделяет рабочий и толкающий газы. Это изменение, наблюдаемое во всех областях опроса, обладает некоторой зависимостью от числа Маха [Рис. 3 справа]. Заметно, что изменение температуры пропорционально увеличению числа Маха, начиная с $M = 2,2$. До этого же поведение зависимости обратное, что может быть объяснено сложным поведением переходов газов на низких числах Маха.

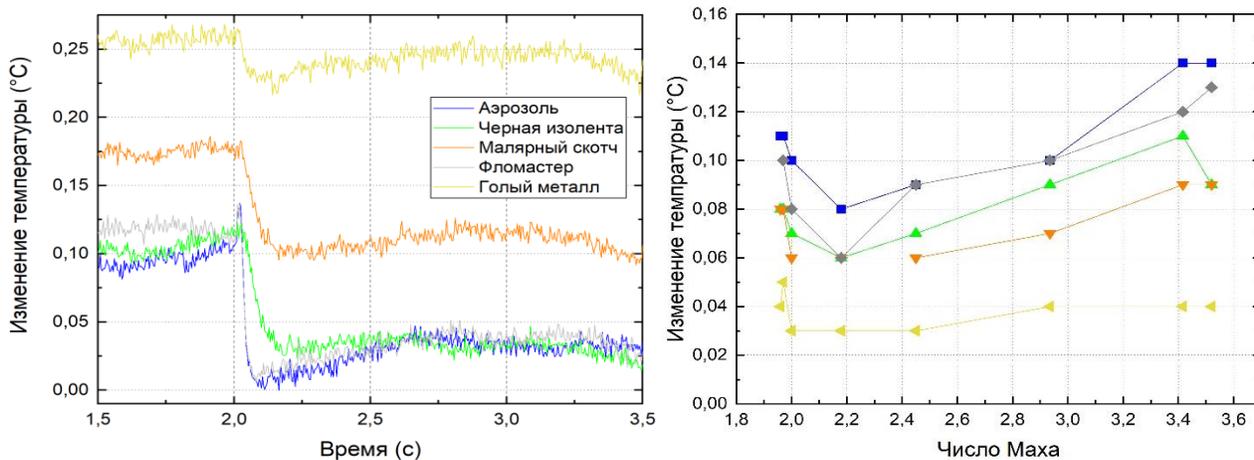


Рис. 3 (слева) – Отрицательное изменение температуры для разных областей опроса при прохождении ударной волны с числом Маха 3,4; (справа) – график зависимости отрицательного изменения температуры от числа Маха.

Излучение из торцевой стенки

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 [Рис. 4 слева] таким образом, что рассматриваемой областью (областью опроса) являлся торец КНД, при отстыкованной разрядной камере [полный вид экспериментальной установки показан на Рис. 2] и вмонтированной тонкой (0,25 мм) металлической пластинке из нержавеющей стали (область опроса выделена зеленым цветом). Ненулевой угол для тепловизора был необходим для обеспечения безопасности. В КВД нагнетается толкающий газ гелий, однако, из-за отстыкованного форвакуумного насоса на конце КНД, давление не понижалось и было равно атмосферному. При прохождении УВ на металлической вставке наблюдается резкое изменение температуры [Рис. 4 справа]. 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 ($M = 1,5$) температура “пробки” изменяется до 392 К, а за отраженной ударной волной температура газа поднимется практически до 500 К. В то же время, скачкообразное изменение температуры на обратной стороне металлической вставки изменяется чуть более, чем на 5 градусов, что опять же связано с теплопроводностью металла на больших, относительно времени прохождения ударных волн, временах.

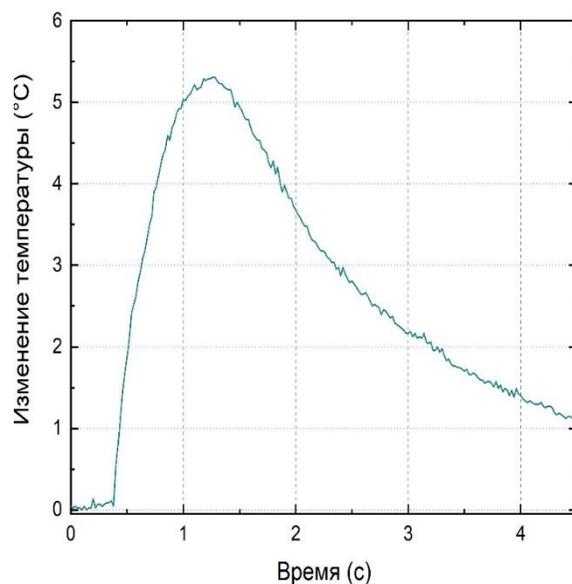
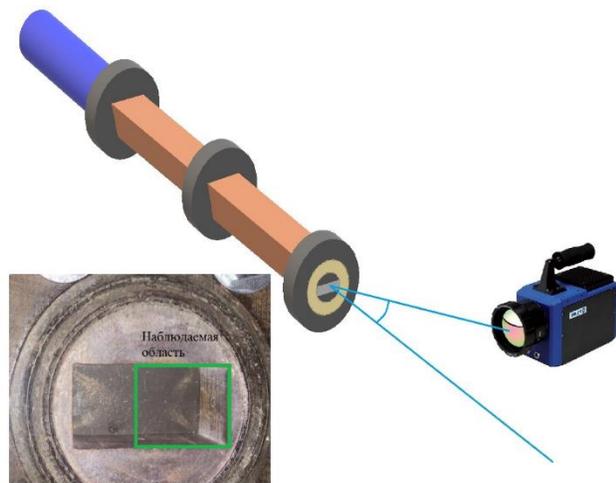


Рис. 4 (слева) – Схема установки для второй конфигурации. Область опроса выделена зелёным цветом; (справа) – изменение температуры при отражении ударной волны с начальным числом Маха 1,5

Заключение

По итогу проведения множества экспериментов при использовании различных допустимых конфигураций, было однозначно установлено, что инфракрасная термография является подходящей, с экспериментальной точки зрения, для исследования и изучения сложных быстропротекающих процессов в газах. Она показала свою неоспоримую способность, с поправкой на теплопроводность металлов, отражать даже небольшие температурные изменения областей опроса. В результате обработки и анализа экспериментальных данных были получены термографические развертки по времени проходящих и отраженных от торца ударных волн. Обнаружены пересечения эмпирических данных с теоретическими трудами. Также выявлены определенные зависимости температурных и временных параметров от чисел Маха. Проведены сравнения с соответствующими численными оценками.

Список литературы

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. -736.
2. *Giovanni Maria Carlomagno, Gennaro Cardone* Infrared thermography for convective heat transfer measurements // Exp. Fluids. 2010 49:1187-1218
3. *Carson L. Runninga,1, Thomas J. Julianoa,2, Joseph S.Jewellb,3, Matthew P. Borgb,4,Roger L. Kimmelb, . Roghelia, H.Olivier, I. Egorov, P. Chuvakhov,* Experimental investigation of Gortler vortices in hypersonic ramp flows, Exp. Fluids 58 (2017).].
4. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е издание, доп. М. Издательский дом Спектр, С. 544, 2013.
5. *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, <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.06.024>