



## **Аннотация**

Цель данной работы заключалась в разработке нового метода введения локализованных возмущений в сверхзвуковой пограничный слой импульсным локализованным нагревом поверхности. Собрана экспериментальная схема импульсного нагрева. В качестве нагревателя использовалась вольфрамовая нить, коммутация осуществлялась транзисторным ключом. Регистрировались осциллограммы падения напряжения на нити и ток при различных длительностях импульса. Написан код для обработки полученных сигналов на языке программирования Python. Проведены оценки выделяемого на нити тепла, её температура и временные характеристики нагрева и остывания; значение сопротивления нити при амплитудном значении температуры, с учетом погрешностей. Проведена проверка на повторяемость работы предложенного импульсного источника возмущений, путем построения графиков среднеквадратичного отклонения.

Ключевые слова: импульсный нагрев, локализованные возмущения, сверхзвуковой пограничный слой.

## **Оглавление**

1. Введение.....	4
2. Экспериментальная часть .....	5
2.1. Описание экспериментальной установки и обработки данных.....	5
2.2. Результаты .....	7
3. Выводы.....	11
4. Список литературы .....	12

## 1. Введение

В данной работе делаются первые шаги к разработке метода введения контролируемых возмущений в сверхзвуковой пограничный слой импульсным локализованным нагревом поверхности модели. В экспериментах по ламинарно-турбулентному переходу исследования искусственных возмущений имеют большое значение. Благодаря возможности синхронизации измерений и введения искусственных пульсаций в таких экспериментах удастся получить детальные данные об эволюции возмущений в пограничных слоях и напрямую сравниваться с теоретическими расчетами.

В экспериментах при сверхзвуковых скоростях, связанных с исследованиями ламинарно-турбулентного перехода, в роли источника искусственных возмущений наиболее часто выступает тлеющий разряд. Но данный метод имеет недостаток, связанный с тем, что в исследованиях прямым численным моделированием развития возмущений проблематично моделировать импульсный разряд в качестве источника возмущений и нет возможности привести постановку расчетов и экспериментов в полное соответствие. Поэтому в данной работе в качестве альтернативы тлеющему разряду был сделан выбор в пользу импульсного нагрева нити до известной температуры, чтобы вводимые в сверхзвуковой пограничный слой возмущения были контролируемы.

Целью данной работы является развитие метода экспериментального исследования ламинарно-турбулентного перехода в сверхзвуковых пограничных слоях.

Были поставлены следующие задачи:

1. Разработка экспериментальной модели источника контролируемых возмущений.
2. Регистрация осциллограмм падения напряжения на нити при различных длительностях импульсного сигнала.

3. Ознакомление с языком программирования Python для дальнейшей обработки полученных результатов.

4. Получение зависимости тока от времени  $I(t)$ , протекающего через нить; мощности  $P(t)$ , выделяемой на нити; сопротивления  $R(t)$  нити; температуры нити  $T(t)$ ; энергия  $Q$ , выделяемая с нити.

## 2. Экспериментальная часть

### 2.1. Описание экспериментальной установки и обработки данных

Схема для постановки экспериментов представлена на рис. 1. Она состоит из источника постоянного напряжения (6), транзисторного ключа (7),

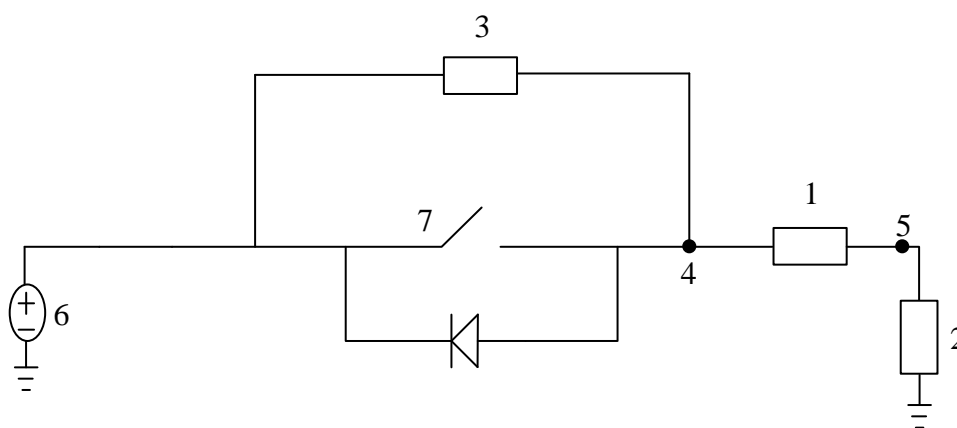


Рис. 1. Схема установки: 1 – вольфрамовая нить; 2 – сопротивление 2 Ом; 3 – сопротивление 1 кОм; 4, 5 – CH1 и CH2 каналы осциллографа; 6 – источник постоянного напряжения; 7 – транзисторный ключ

вольфрамовой нити (1), сопротивления (2) 2 Ом, подключенного в схеме последовательно для измерения силы тока в цепи, сопротивления (3) 1 кОм, используемого для контроля сопротивления нити при комнатной температуре. Управлением ключом осуществлялось импульсами с генератора-частотомера OWON AG1012F. Для регистрации импульсных сигналов применялся цифровой осциллограф АКИП-4122/11V.

Холодное сопротивление нити было измерено с помощью цифрового мультиметра Agilent 34401A и равняется 0,23 Ом.

В ходе проведения эксперимента при различных длительностях генерируемого импульсного сигнала были получены осциллограммы падения напряжения на нити и резисторе 2 (CH1 канал) и отдельно на этом же

резисторе (СН2 канал). Результаты были записаны с осциллографа в количестве 1 млн. точек при частоте дискретизации 1 МГц в формате csv. Сложность обработки такого количества данных в Excel обуславливается их большим количеством и форматом. Поэтому в качестве метода для обработки результатов был выбран язык программирования Python, а библиотека, позволяющая считать такой формат в виде таблицы - Pandas. Основное преимущество такого метода заключается в автоматизации извлечения и последующей обработки данных. В самом коде реализовано получение зависимостей, поставленных в задачах эксперимента.

График сигнала с длительностью импульса 50 мкс представлен на рис. 2 20-ю периодами. Нарезка осуществлялась выделением 70-ти точек каждого периода через каждые 50000 точек. Также на этом рисунке можно заметить небольшую неточность в  $\pm 1$  отсчет АЦП.

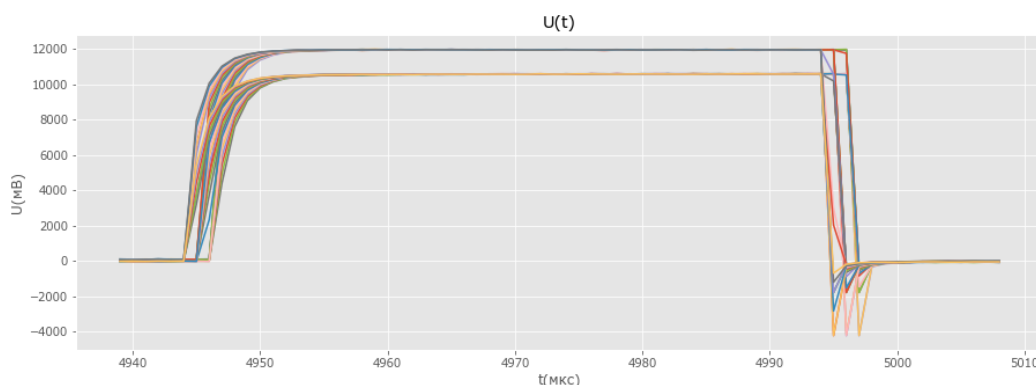


Рис. 2. График 20-ти периодов  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$

Поэтому для того, чтобы получить падения напряжения на нити и ток в цепи, необходимо рассмотреть осредненные графики  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$  (рис. 3), которые были получены следующим образом:

- 1) Получение точки начала импульса путем сравнения среднеквадратичного отклонения на горизонтальном участке и на участке роста.
- 2) Поскольку не имеет значение положение графика осредненных значений по оси времени, то перемещаем начало всех периодов в ноль.
- 3) Осреднение значений.

## 2.2. Результаты

Осредненное амплитудное значение падения напряжения на первом канале  $CH1\_Voltage(mV) = 11,937$  В, а на втором канале  $CH2\_Voltage(mV) = 10,572$  В. Используя эти значения, получим значение напряжения на нити = 1,365 В.

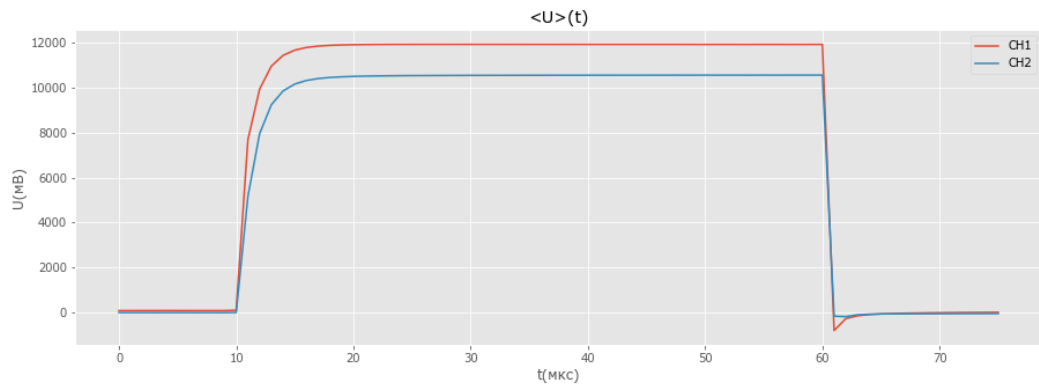


Рис. 3. График средних значений  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$

Также следует рассмотреть график среднего значения тока  $I(t)$ , которое также рассчитывалось по 20-ти периодам. Мгновенное значение тока вычислялось по следующей формуле:

$$I(t) = \frac{U_2(t)}{R_2} \quad (1)$$

Где  $U_2(t)$  – падение напряжения на резисторе 2;  $R_2$  – сопротивление резистора.

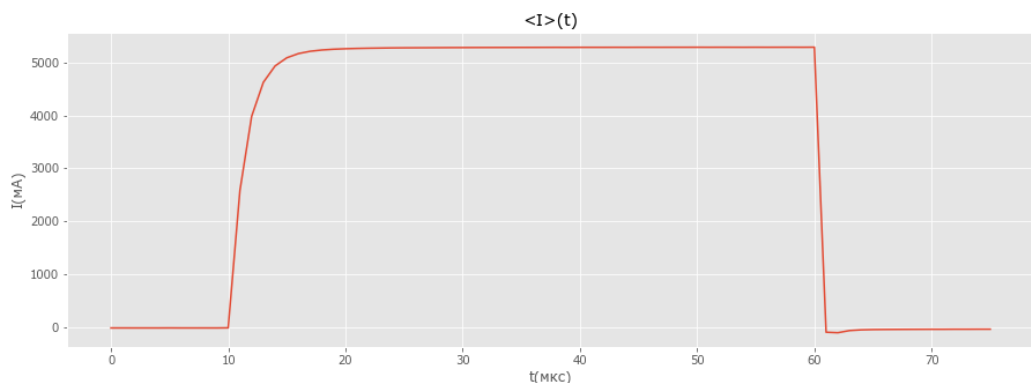


Рис. 4. График среднего значения  $I(t)$

Используя усредненные данные, по которым построен график рис. 4, определим среднее амплитудное значение тока, протекающего как через резистор 2, так и через нить, равное 5,286 А.

Мгновенную мощность, выделяемую на нити, можно рассчитать по формуле:

$$P(t) = (U_1(t) - U_2(t)) \cdot I(t) \quad (2)$$

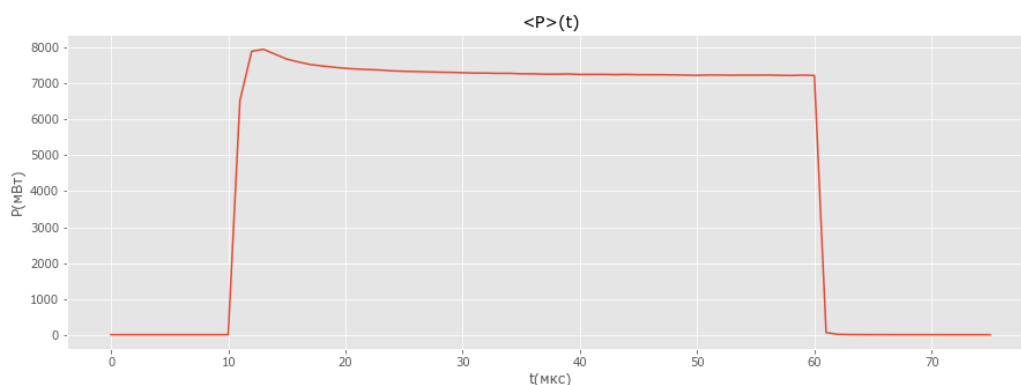


Рис. 5. График среднего значения мощности  $P(t)$ , выделяемой на нити

Аналогично определяем среднее амплитудное значение мощности - 7,216 Вт. В данной работе важно рассчитать количество тепла, выделяющегося с нагревающейся нити, поскольку это имеет особое значение с точки зрения эффективности разрабатываемого метода. Для импульса длительностью 50 мкс количество выделившейся теплоты, посчитанное в самом коде численным интегрированием, равно  $Q = 0,37$  мДж.

Также необходимо рассмотреть усредненную зависимость сопротивления нити от времени  $R(t)$ , график которой приведен на рис. 6.1. Он имеет смещение по вертикали, связанное с ошибкой установки нуля на осциллографе. Поэтому воспринимать его стоит следующим образом. Начальный горизонтальный участок графика – это участок сопротивления холодной нити. Увеличение сопротивления начинается соответственно с началом импульса, которое связано с увеличением температуры нити. На следующем участке нить нагрета до амплитудного значения температуры. Далее, с уменьшением падения напряжения на нити, падает её температура, а соответственно и сопротивление. На последнем участке сопротивление нити стремится к



изначальному. Также построим обрезанный график  $R(t)$  (рис. 6.2), чтобы детально рассмотреть участок нагретой нити. По рис. 6.1 можно заметить, что приблизительное время остывания нити равно 290 мкс, а нагрева – 3-4 мкс. Расчет  $R(t)$  осуществляется по формуле (3).

$$R(t) = \frac{U_1(t) - U_2(t)}{I(t)} \quad (3)$$

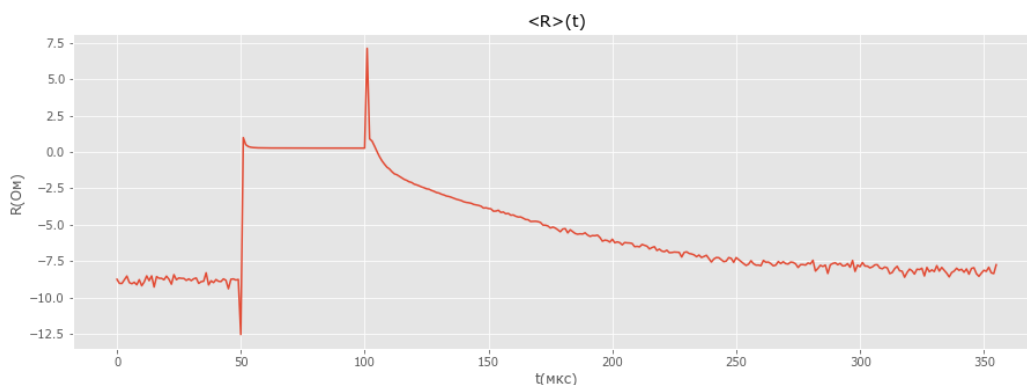


Рис. 6.1. График среднего значения  $R(t)$  нити

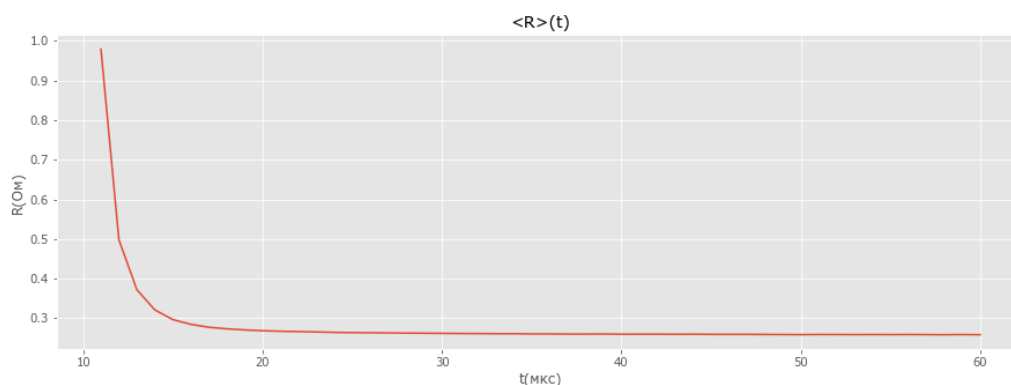


Рис. 6.2. Обрезанный график среднего значения  $R(t)$

Сопротивление нагретой до амплитудного значения температуры нити приблизительно равно 0,26 Ом. Оценим погрешность полученного результата. Формула для ее расчета выглядит следующим образом.

$$\Delta R = \frac{\Delta(U_1 - U_2)}{U_1 - U_2} + \frac{R_2}{U_2} \left( \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta R_2}{R_2} \right)$$

Согласно документации по осциллографу, используемому в работе, погрешность измерений падения напряжения оценивается как  $\pm(1\% \pm 3 \text{ емр})$ . Для мультиметра, которым мерили сопротивление  $R_2=2,002 \text{ Ом}$ , погрешность

измерений оценивается как  $\pm(0,3\%(\text{от показания}) \pm 0,3\%(\text{от предела измерения}))$ ). Проведя все необходимые расчеты, получим  $\Delta R = 0,073 \text{ Ом}$ .

На рис. 7 приведена зависимость температуры нити от времени  $T(t)$ . В данной работе этот параметр следует рассмотреть, поскольку именно по нему удобно вводить контролируемые возмущения. Зависимость сопротивления металла от температуры определяется следующей формулой:

$$R(T) = R_0(1 + \alpha \Delta T) \quad (4)$$

Где  $R_0$  – сопротивление при комнатной температуре,  $\alpha$  – температурный коэффициент исследуемого материала,  $\Delta T = T(t) - T_0$  – разность между температурой в данный момент времени и  $R_0$ ,  $T_0$  – комнатная температура.

Вычленив из выражения (4)  $T(t)$  получим:  $T(t) = T_0 + \frac{1}{\alpha} \left( \frac{R(T)}{R_0} - 1 \right)$ .

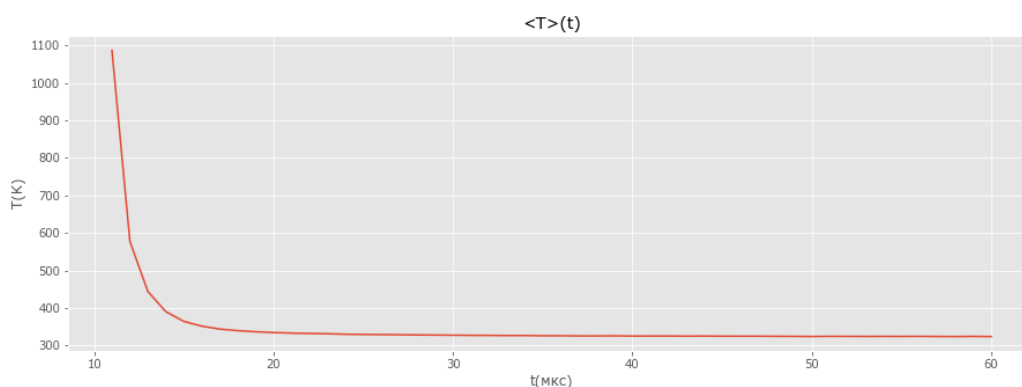


Рис. 7. График температуры нити  $T(t)$

В данной работе не учитывалась зависимость коэффициента  $\alpha$  от температуры. Поэтому  $T(t)$  и  $R(t)$  имеют схожие зависимости. Температура нити, нагретой до амплитудного значения, примерно  $51,81 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Погрешность для температуры нити равна  $0,61 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Используя полученные осредненные зависимости построим графики среднеквадратичных отклонений. Рассмотрим один из таких на примере  $R(t)$  (рис. 8).

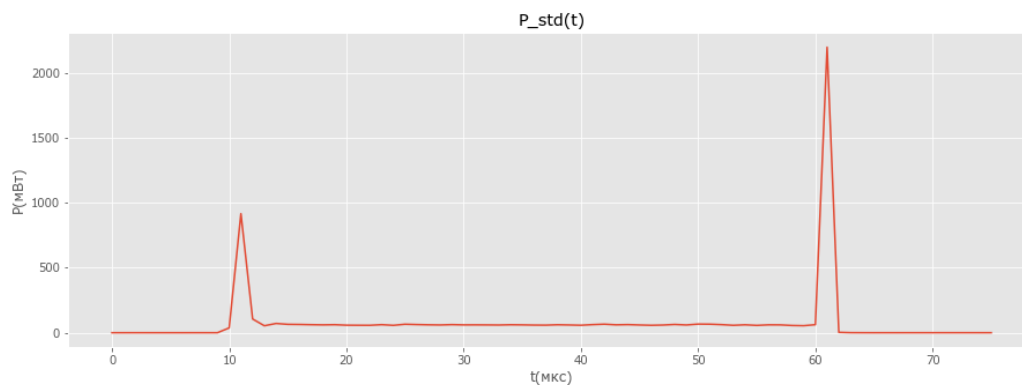


Рис. 8. График среднеквадратичного отклонения  $P(t)$

На данном графике можно заметить скачок среднеквадратичного отклонения в начале и конце импульса, что связано с работой транзисторного ключа.

В приложении к работе размещены примеры всех графиков при длительностях сигнала 100 мкс и 150 мкс.

### 3. Выводы

В данной работе были предприняты попытки разработки метода введения контролируемых возмущений в сверхзвуковой пограничный слой. Собрана схема для нагрева нити, но имеются некоторые проблемы по сборке полной модели для введения искусственных возмущений. Получены осредненные зависимости  $U(t)$ ,  $I(t)$ ,  $P(t)$ ,  $R(t)$ ,  $T(t)$ ; количество выделяемой энергии с нити, которая зависит лишь от длительности импульса. Сопротивление нити при амплитудном значении температуры ( $51,81 \pm 0,61^\circ\text{C}$ ) с учетом погрешностей равно  $0,26 \pm 0,073$  Ом. Графики  $R(t)$ , а соответственно и  $T(t)$  смещены и поэтому анализировать их довольно сложно. В схеме, изображенной на рис. 1, резистор (3) следовало ставить с меньшим сопротивлением, чтобы тем самым минимизировать влияние ошибки установки нуля на осциллографе. Также следует отметить, что тепло, выделяемое на нити за длительность импульса, по порядку близко к энергии, выделяемой при импульсном разряде, в экспериментах с которым все-таки большая часть энергии уходит на излучение.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что необходимо дальнейшее изучение разрабатываемого метода. Следует также учитывать, что не вся выделяемая энергия уходила бы в сверхзвуковой поток. Часть ее уйдет в саму модель. Также важно, что эксперимент по введению искусственных возмущений проводился бы при вакуумных давлениях, что не соответствует условиям, при которых ставились эксперименты в данной работе.

#### **4. Список литературы**

1. Катасонов М. М., Козлов В. В., Никитин Н. В., Павленко А. М. Возникновение и развитие локализованных возмущений в круглой трубе и пограничном слое. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. Новосибирский гос. ун-т. Новосибирск: ИПЦ НГУ 2019. 249 с.

2. Яцких А. А. Экспериментальное исследование возбуждения и эволюции волнового пакета в сверхзвуковых пограничных слоях: дис. ... канд. физ. - мат. наук. 01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 2019. 145 с.

3. <https://www.astena.ru/rekl/34401a-rus.pdf>

4. <https://www.elizpribor.ru/files/products/akip-4122-2-3.pdf>