

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

А.А. Воробьев, А.И. Довгялло, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин,
Г.В. Соколов, Д.А. Угланов

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ
АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В РЕЗОНАТОРЕ
ГЕЛЬМГОЛЬЦА

Лабораторный практикум

САМАРА 2017

УДК 534.142.4

Авторы: **А.А. Воробьев, А.И. Довгялло, С.О. Некрасова, Д.В. Сармин, Г.В. Соколов, Д.А. Угланов**

Рецензенты: д-р техн. наук, доц. А.А. Иголкин

Исследование энергетических характеристик термического возбуждения акустических колебаний в резонаторе Гельмгольца: лабораторный практикум / [А.И. Довгялло и др.]. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 55 с.: ил.

В данном лабораторном практикуме представлено теоретическое описание рабочих процессов термоакустических преобразователей. Рассмотрена одна из возможных конструкций преобразователей данного типа. Описаны подробные указания к выполнению лабораторной работы по исследованию рабочих характеристик термоакустического преобразователя энергии, а также описана методика численного моделирования рабочих процессов в термоакустической установке.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки бакалавра: 13.03.03 – Энергетическое машиностроение, 15.03.04 - Автоматизация технологических процессов и производств. 15.03.05 - Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, 24.03.05 – Двигатели летательных аппаратов; по специальности 24.05.02 – Проектирование авиационных двигателей и энергетических установок, по направлению подготовки магистров 24.04.05 - Двигатели летательных аппаратов, а также может быть полезно слушателям курсов, аспирантам и специалистам.

Подготовлено на кафедре теплотехники и тепловых двигателей.

УДК 534.142.4

© Самарский университет, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ	4
1.1 Введение в термоакустику	4
1.2 Акустические процессы	5
1.3 Термодинамические процессы	7
1.4 Энергетическая оценка	15
1.5 Резонатор Гельмгольца.....	18
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА.....	19
2.1 Описание установки	19
2.2 Описание программы Sound Card Oscilloscope.....	22
3 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	25
4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	27
5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА	28
6 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	29
6.1 Введение.....	29
6.2 Построение расчетной сеточной модели.....	30
6.3 Расчет рабочих процессов термоакустического преобразователя в CFD-ACE.....	43
6.4 Обработка полученных результатов	49
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	55

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Введение в термоакустику

Термоакустика это наука изучающая взаимное преобразование акустической и тепловой энергии. В основе этой науки лежит принцип сформулированный Лордом Рэлеем в 1857 году в [1], где он дал первый качественный анализ акустических колебания вызванных теплом: «Если теплота сообщается газу в момент наибольшего сжатия или отнимается от него в момент наибольшего разрежения, то это усиливает акустические колебания». Не смотря на простоту формулировки данного принципа, для описания рабочих процессов термоакустических установок используется сложный комплекс теплофизических процессов, основанный на взаимодействии явлений акустической, теплофизической и гидродинамической природы. Эта многофакторность обуславливает особенности термоакустических машин и, в конечном итоге, их внешние характеристики.

Термоакустический двигатель - это установка, в которой за счет подвода тепла (внешнего или внутреннего) возникают акустические колебания. Термоакустические преобразователи набирают большой интерес у множества исследовательских центров в последние 20-30 лет. Преимущество установок работающих на основе термоакустического принципа заключается в совершении механической работы за счет возмущений акустического поля, при этом в преобразователе энергии отсутствуют какие-либо подвижные части, что значительно повышает ресурс эксплуатации установки, относительно современных аналогов работающих на других принципах. Основные рабочие процессы в термоакустическом двигателе описываются с применением одновременно как теории акустики так и термодинамики.

1.2 Акустические процессы

Работа термоакустического преобразователя связана с наличием акустических колебаний. Предположим, что продольная, плоская, гармоническая волна распространяется вдоль оси x резонатора, который заполнен идеальным газом. Акустические колебания зададим с помощью уравнения, описывающего стоячую волну:

$$p(x, t) = p_s \cos kx \sin \omega t = p_s \cos(\omega t - kx), \quad (1.1)$$

где p_s - амплитуда избыточного давления звуковой волны;

$k = \frac{\omega}{a}$ - волновое число;

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота колебаний;

a - скорость распространения звуковой волны.

Распространение звуковой волны происходит благодаря колебательным движениям элементарных газовых объемов - частиц. Скорость их движения можно определить, воспользовавшись вторым законом Ньютона, который применительно к акустическим процессам можно записать в виде:

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad (1.2)$$

После подстановки (1.1) в (1.2) и интегрирования, получим:

$$u(x, t) = \frac{p_s}{\rho_0 a} \sin kx \cos \omega t = \frac{p_s}{\rho_0 a} \sin(\omega t - kx), \quad (1.3)$$

где ρ_0 - средняя плотность рабочего газа.

Распространение акустической волны, согласно Лапласу, является адиабатическим процессом. С учетом этого скорость распространения звука определяется как:

$$a = \sqrt{\gamma \frac{p_0}{\rho_0}}, \quad (1.4)$$

Амплитуда скорости колебаний частиц газа:

$$u_s = \frac{p_s}{\rho_0 a}, \quad (1.5)$$

Величину смещения частиц газа вдоль оси x можно определить как:

$$\xi = \int u dt = -\frac{u_s}{\omega} \cos(\omega t - kx) = \xi_s \sin(\omega t - kx - \pi/2), \quad (1.6)$$

где $\xi_s = \frac{p_s}{\omega \rho a}$ - амплитудное значение смещения частиц газа.

Пульсации давления вызывают локальные изменения температуры газа. Воспользовавшись уравнениями состояния идеального газа:

$$pV = RT = p/\rho \quad (1.7)$$

Представим уравнение (1.7) в виде адиабаты Пуассона:

$$p_s = p_0 \left(\frac{\rho_s}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (1.8)$$

После преобразования уравнения (1.8) получим:

$$T_s = T_0 \left(\frac{p_0 + p_s}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}, \quad (1.9)$$

Как показано в работе [2], выражение для разницы температур, вызванной пульсациями давления в звуковой волне, можно получить в упрощенном виде:

$$\Delta T_s \cong \frac{(\gamma-1) p_s}{\gamma p_0} T, \quad (1.10)$$

Рассмотрим волновые процессы в закрытой и открытой трубках, представленные рисунке 1.1. Если в закрытой трубе имеет место стоячая акустическая волна, тогда на торцах трубы образуются узлы колебательной скорости, а в центрах - пучность.

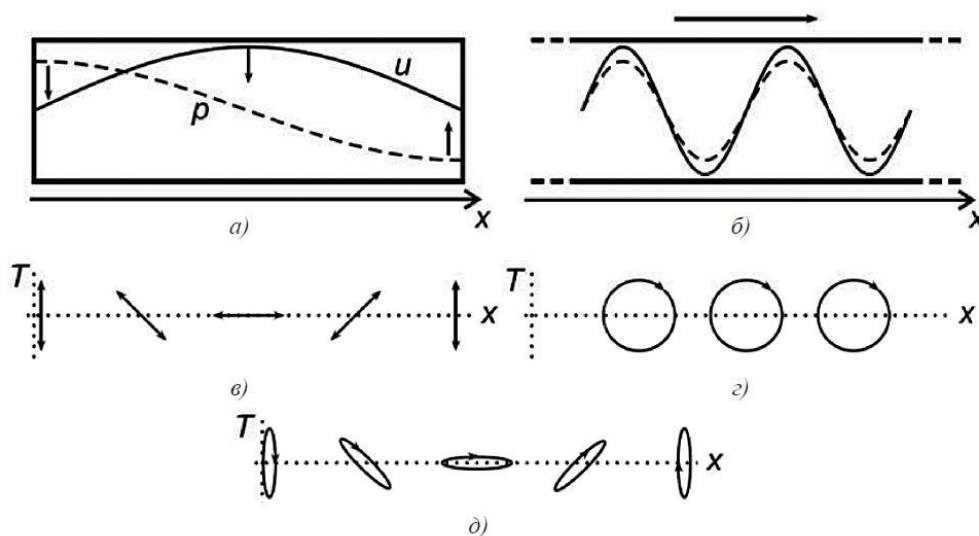
Для функции давления ситуация обратная, так как фазы колебаний давления и скорости отличаются на величину $\Delta\phi \leq \pi/2$. Поэтому в центральной части канала, вдали от стенок, частицы газа имеют максимальное смещение $\xi_{s_{\max}}$ при неизменной температуре. В торцах канала перемещения частиц отсутствуют, а изменения температуры максимальны. На удалении от узлов давления и скорости, частицы газа

совершают колебательные движения $\xi(x)$, их температура изменяется в зависимости от положения оси канала.

В открытой трубе, представленной на рисунке 1.1 б, формируется бегущая волна, в которой значения функции скорости и давления изменяются синхронно. Такие колебания вызывают циклические и однонаправленные изменения температуры частиц среды.

1.3 Термодинамические процессы

Работа термоакустических преобразователей основана на взаимодействии температурных полей, вызванных звуковыми волнами, с границами каналов - теплообменными поверхностями. Предположим, что изучаемые микрообъемы газа расположены вблизи стенки представленной на рисунке 1.2, которая имеет продольный градиент температур ∇T_m .



а - стоячая волна

б - бегущая волна

в - диаграмма $T=f(x)$ для частиц стоячей волны

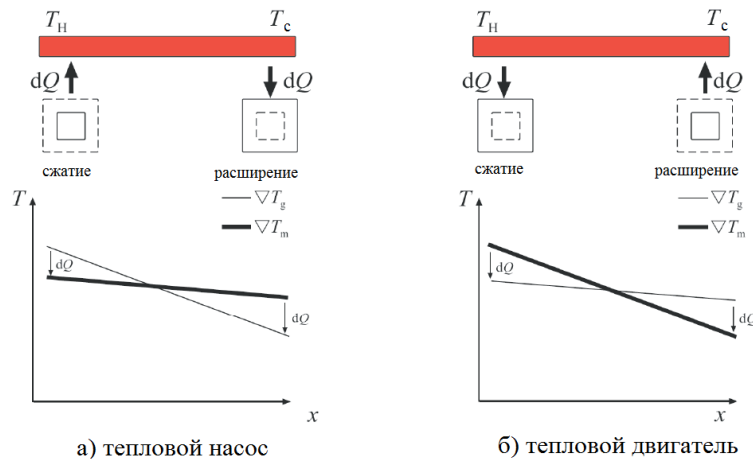
г - диаграмма $T=f(x)$ для бегущей волны

д - случай наложения стоячей и бегущей волн

Рисунок 1.1 - Изменение температуры частиц газа в акустической волне вдоль оси канала за один цикл

Если градиент температуры вдоль стенки канала меньше, чем градиент температур ∇T , который возникает в элементарном объеме газа при его смещении, как показано на рисунке 1.2 а, то газ будет отбирать тепло от стенки при минимальном давлении и отдавать его стенке в зоне с максимальным давлением. Для создания такого механизма необходимо совершать работу - поддерживать колебательный процесс. При таких условиях частица газа работает как термоакустический холодильник или тепловой насос.

В случае, когда продольный градиент температуры превышает градиент температуры, развиваемый элементарной газовой тепловой машиной, тепло от стенки будет передано газу в зоне с большим давлением и отведено от осциллирующего объема в области пониженного давления. В результате амплитуда давления будет возрастать, соответственно будет расти энергия акустического поля. Таким образом будет реализован термоакустический тепловой двигатель.



а - малый температурный градиент

б - большой температурный градиент

Рисунок 1.2 - Диаграммы $T=f(x)$

Рассмотрим подробнее основные термодинамические процессы, протекающие в термоакустических тепловых машинах. В данном случае мы не будем учитывать влияние вязкости среды на характер ее движения.

На рисунке 1.3 показана принципиальная схема простейшего термоакустического преобразователя. Это полуволновой резонатор, внутри которого расположены теплообменные поверхности - рекуперативные теплообменники и регенератор (стек). Считаем, что стек - это система плоскощелевых каналов, длиной L_s , зазор между пластинами равен $2\delta_k$, продольный градиент температур в регенераторе :

$$\nabla T_m = \Delta T_m / L_s = (T_H - T_C) / L_s. \quad (1.11)$$

Это означает, что при смещении вдоль оси x на расстояние $\xi = 2x_1$ температура стенки изменится на величину $2x_1 \nabla T_m$. Термодинамический цикл, совершаемый элементарной частицей газа под действием акустической волны, в принятой постановке, схож с циклом Брайтона, реализуемым в газотурбинных двигателях, который состоит из четырех последовательных процессов, представленных на рисунке 1.4, а именно: двух адиабатических этапов сжатия и расширения, и двух изобарных процессов, сопровождающихся теплообменом между газом и стенками стека.

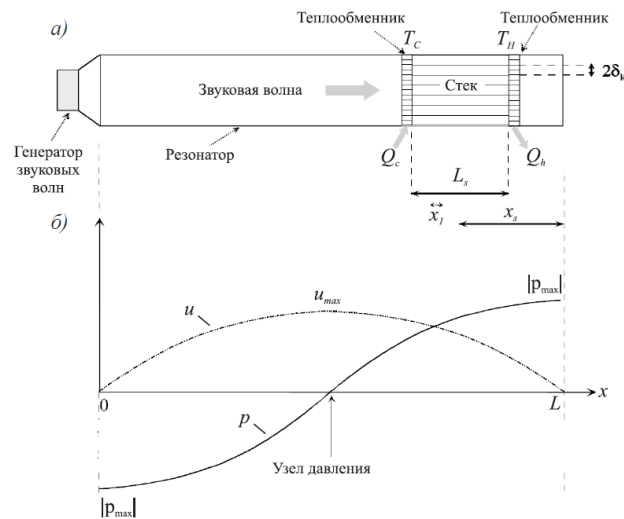


Рисунок 1.3 - Схема термоакустического преобразователя и его функции $p, u=f(x)$

Рассмотрим каждый процесс отдельно:

1. Адиабатическое сжатие-расширение (шаги 1 и 3). В начале процесса объем элементарной частицы газа равен V , давление $P_m - P_1$, температура

$T_m - x_1 \nabla T_m$. Акустическая волна вызывает смещение частицы газа на расстояние $\xi = 2x_1$, при этом микрообъем газа сжимается до $V - V_1$, а его температура увеличивается на величину $2T_1$.

В адиабатных процессах параметры давления и температуры связаны между собой термодинамическими соотношениями:

$$T dS = c_p dT + \frac{T}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) dp = 0, \quad (1.12)$$

Используя (1.12) можно получить:

$$T_1 = \left(\frac{T\beta}{\rho c_p} \right) p_1. \quad (1.13)$$

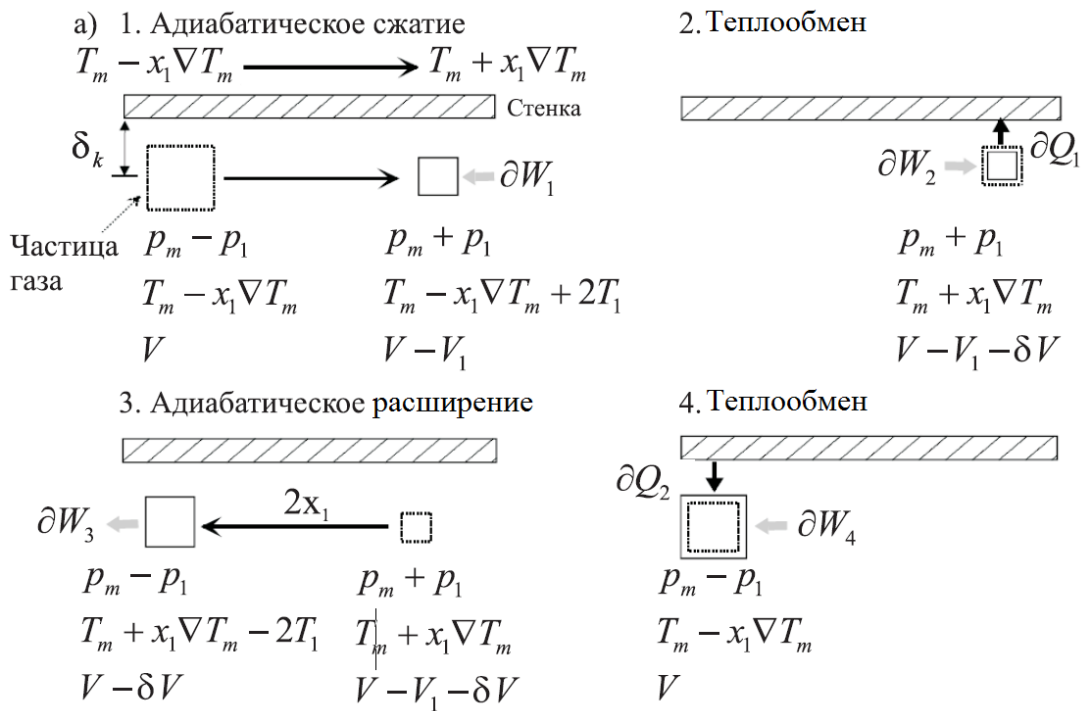


Рисунок 1.4 - Последовательные этапы и термодинамические параметры частицы

Учитывая, что для изобарного процесса в идеальном газе $T_m \beta = 1$ и коэффициент термического расширения определяется выражением:

$$\beta = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p, \quad (1.14)$$

Можно получить выражение, аналогичное (1.10):

$$T_1 = \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{p_1}{p_m} T_m, \quad (1.15)$$

Индекс m показывает, что рассматриваются усредненные параметры элементарного газового объема - частицы. После ее смещения на расстояние $\xi = 2x_1$ термодинамические параметры изменятся, температура частицы станет равна $T_m - x_1 \nabla T_m + 2T_1$, давление $P_m + P_1$, объем $V - V_1$.

На этапе расширения частицы газа возвращаются в свое первоначальное положение, перемещаясь на расстояние $\xi = 2x_1$. В этой точке термодинамические параметры частицы газа принимают следующие значения: давление $P_m - P_1$, температура $T_m + x_1 \nabla T_m - 2T_1$ и объем $V - \delta V$. Теперь температура и объем частицы газа иные, чем в первоначальный момент, так как внутренняя энергия микрообъема газа изменилась на величину переданного стенке количества тепла δQ_1 .

2. Изобарный теплообмен (шаги 2 и 4). В начальной x и конечной $x+2x_1$ точках скорость частиц газа близка к нулю. При этом разница температур газовой частицы и поверхности стека достигает величины:

$$\delta T_{2,4} = 2T_1 - 2x_1 \nabla T_m, \quad (1.16)$$

Если $\delta T \neq 0$, то имеем условия для обмена теплотой между газом и элементом стека, в котором будет передано количество тепла δQ_1 и δQ_2 . Если масса газа в рассматриваемом микрообъеме m , тогда количество переданной теплоты равно:

$$\delta Q_{3,4} \approx mc_p \delta T_{3,4}, \quad (1.17)$$

Таким образом, последовательные шаги 1-2-3-4 образуют термодинамический цикл, изображенный на рисунке 1.5.

Работа, совершенная элементарной частицей газа, в данном термодинамическом цикле равна:

$$\delta W = \int_{ABCD} p dV \approx -2p_1 \delta V, \quad (1.18)$$

Учитывая взаимосвязь δT и δV , через формулу для коэффициента термического расширения (1.14), получим:

$$\delta V = (\beta V)_m \delta T, \quad (1.19)$$

Подставив (1.19) в (1.18), работу элементарного термодинамического цикла можно переписать в виде:

$$\delta W \approx -2p_1(\beta V)_m \delta T, \quad (1.20)$$

Из формулы (1.20) видно, что направление процессов переноса теплоты определяет знак величины δT . Если $\delta T < 0$, то тепло от стека передается частице газа и реализуется термоакустический двигатель, если же $\delta T > 0$, то газ передает стенке стека тепло, что характерно для термоакустического холодильника.

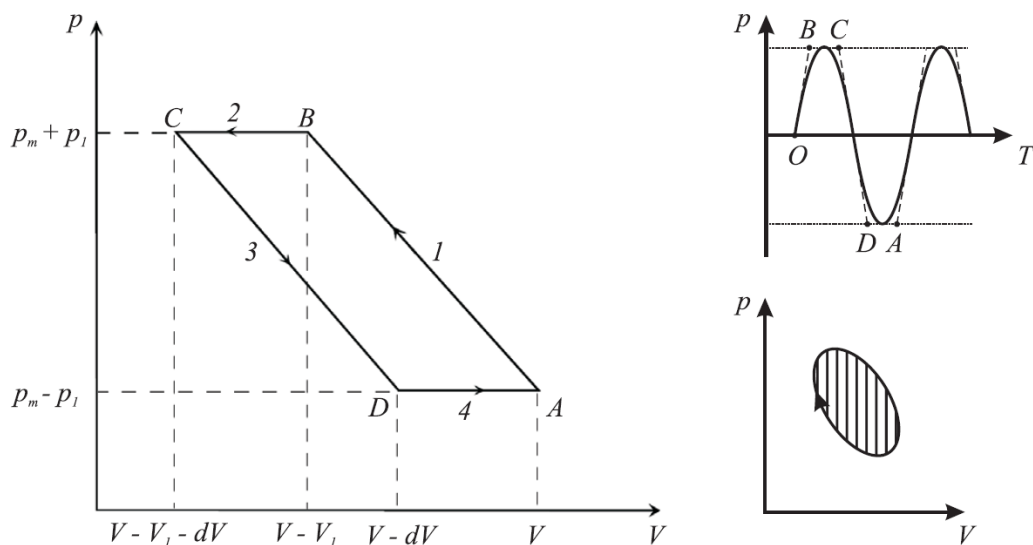


Рисунок 1.5 - P-V диаграмма идеального термоакустического цикла

Если изменение температуры в адиабатическом процессе расширения(сжатия) совпадает с изменением температуры стенки стека по длине, $\delta T = 2T_1 - 2\chi_1 \nabla T_m = 0$, то градиент температур называется критическим:

$$\nabla T_{crit} = \frac{T_1}{x_1}, \quad (1.21)$$

Учитывая (1.13) и зная, что $x_1 = u_s/\omega$, после преобразования, получим:

$$\nabla T_{crit} = \frac{p_1 \omega}{\rho_m c_p u_s}, \quad (1.22)$$

Два изложенных выше режима работы термоакустического преобразователя, можно характеризовать с помощью отношения температурного градиента организованного в установке, к критическому градиенту, называемого нормализованным градиентом:

$$\Gamma = \frac{\nabla T_m}{\nabla T_{crit}}, \quad (1.23)$$

Изменение температуры элементарного газового объема T_1 при его смещении на расстояние x_1 - величина крайне малая, но число этих микро объемов велико, как проиллюстрировано на рисунке 1.6. Их количество можно оценить как :

$$n = L_s/x_1, \quad (1.24)$$

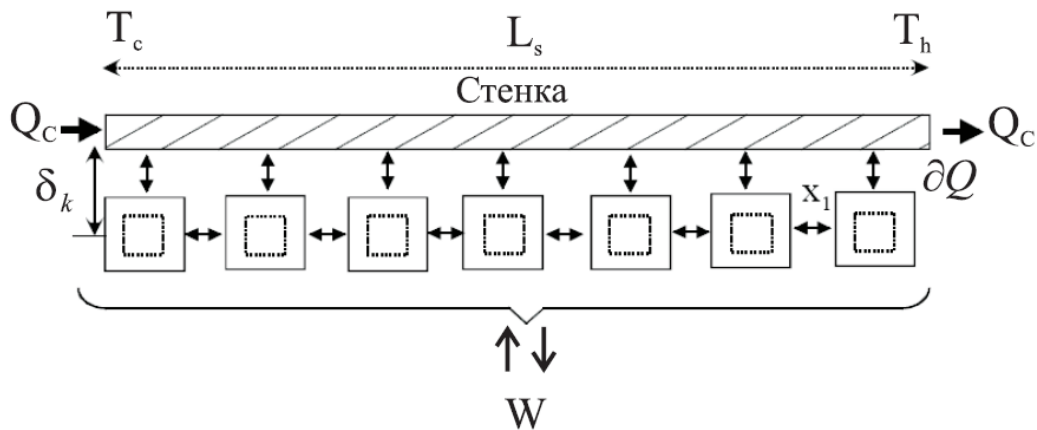


Рисунок 1.6 - Механизм переноса энергии

Таким образом, величина $\Delta T_m \gg T_1$ и в реальных устройствах может достигать десятков и более градусов.

Критический градиент ∇T_{crit} определяется разницей температур в двух противоположных точках цикла, которые занимает частица газа, когда ее скорость колебательного движения близка к нулю. Зная, что:

$$x_1 = \xi/2 = \frac{p_0}{\rho\omega a} \sin kx_s \cong \frac{p_0}{\rho a^2} x_s, \quad (1.25)$$

Подставим x_1 и T_1 в (1.21), получим:

$$\nabla T_{crit} = \frac{T_1}{x_1} = \gamma \frac{p_m T_1}{p_0 x_s} = (\gamma - 1) \frac{T_m}{x_s}, \quad (1.26)$$

Данное выражение демонстрирует факт того, что максимальное значение ∇T_{crit} вдоль стека достигается в зонах с максимальным давлением, вблизи торца резонатора. Например, на рисунке 1.3 стек расположен возле закрытого конца резонатора, но его положение может быть изменено зеркально, относительно середины резонатора.

Введем понятия необходимых нам масштабных величин:

1. Глубина вязкостной проницаемости - это расстояние по нормали от стенки до осциллирующего газа, на котором наличие стенки не оказывает влияния на характер движения потока.

$$\delta_v = \sqrt{\frac{2\nu}{\omega}} \quad (1.27)$$

2. Глубина термической проницаемости - это расстояние по нормали от стенки до осциллирующего газа, на котором наличие температурного градиента на стенке, не оказывает влияния на характер движения потока.

$$\delta_k = \sqrt{\frac{2k}{\omega\rho c_p}} \quad (1.28)$$

Данные величины отвечают за количество газа, которое участвует непосредственно в совершении работы термоакустического цикла. Если расстояние между пластинами стека будет слишком велико, то большая доля потока будет просто адиабатически перемещаться из стороны в сторону, не реализуя при этом процесс теплообмена. Если же расстояние между пластинами стека слишком мало, то весь газ будет изотермически осциллировать

внутри каналов стека, таким образом не совершая процесс переноса тепла. Поэтому для термоакустических преобразователей использующих стек, расстояние между его пластинами должна быть порядка нескольких глубин термического и вязкостного проникновения, а отношение между этими величина характеризуется числом Прандтля, которое должно принимать следующее значение:

$$\text{Pr} = \left(\frac{\delta_v}{\delta_k}\right)^2 \approx 1, \quad (1.29)$$

Выше изложенные принципу проиллюстрированы на рисунке 1.7.

1.4 Энергетическая оценка

Вернемся к введенным ранее понятиям тепла переданного элементарному объему и совершенной в результате этой передачи тепла работе (1.17 и 1.18). Используя 1.23, 1.22 и 1.16, перепишем выражения 1.17 и 1.18 в следующем виде:

$$\delta Q \approx -\frac{1}{2} V p_1 (\Gamma - 1), \quad (1.30)$$

$$\delta W \approx \frac{1}{4} \left(\frac{p_m^2 V \beta}{\rho c_p} \right)_m (\Gamma - 1), \quad (1.31)$$

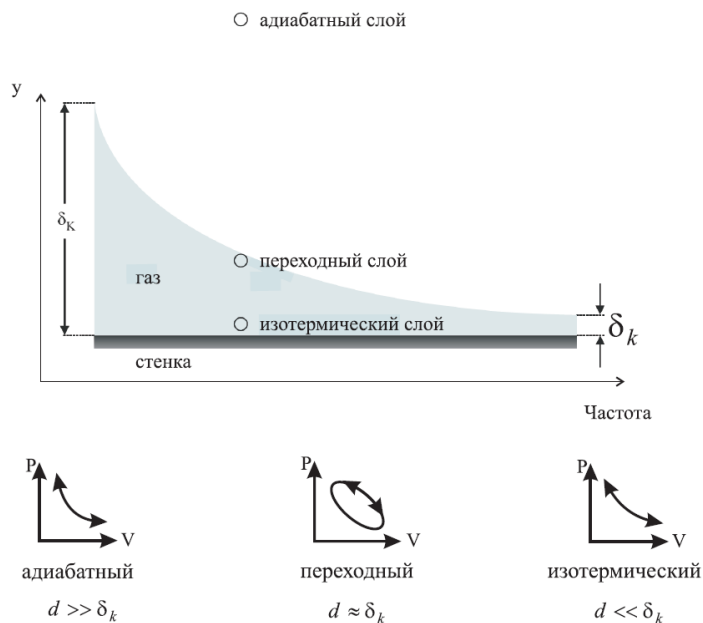


Рисунок 1.7 - Зависимость δ_k от частоты акустических колебаний и P-V диаграмма элементарных термодинамических циклов в различных зонах пограничного слоя

Данные выражения показывают как отношение температурного градиента организованного в установке к критическому температурному градиенту влияет на тип термоакустического преобразователя, ранее это было описано с помощью (1.16), при этом затрагивался только характер изменения температуры. Очевидно, что знак разности ($\Gamma-1$) показывает направление переноса теплоты - от газовой частицы к стенке или наоборот, и направление совершения работы - либо работа вырабатывается преобразователем, либо её необходимо совершать нам, для создания необходимого температурного градиента. Иными словами, с чем мы имеем дело, с холодильником или с двигателем.

Рассмотрим элемент стека длиной L_s , представленный на рисунке 1.8. Периметр этого элемента равен Π , толщиной пластин пренебрегаем, получается что его ширина это $\Pi/2$. Выше было показано, что в процессе участвует слой газа порядка величины δ_k . Тогда эффективный объем газа, заключенный в этом слое, можно определить как $1/2\Pi\delta_k u_1$.

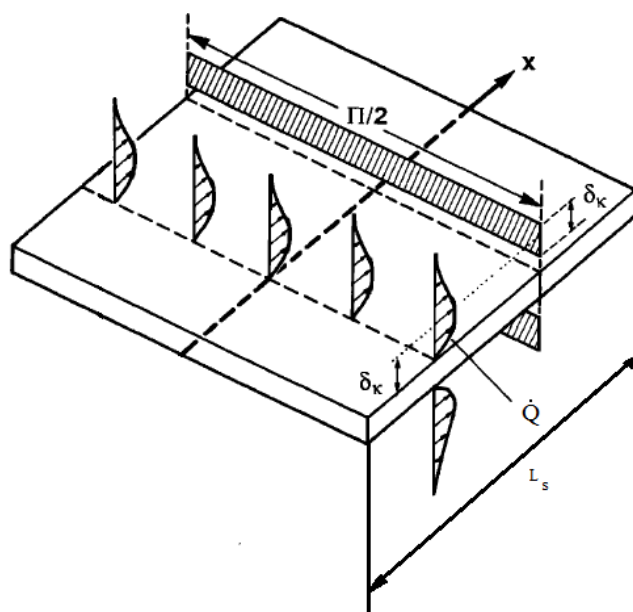


Рисунок 1.8 - Элемент стека

После интегрирования выражения (1.30) по ширине стенки, получим значение количества теплоты, передаваемой за счет термоакустического взаимодействия, через поверхность площадью $1/2\Pi\delta_k$:

$$\dot{Q} = -\frac{1}{2}\Pi\delta_k p_1 u_1 (\Gamma - 1), \quad (1.32)$$

Проанализируем составляющие данного выражения и оценим их влияние на величину теплового потока:

- количество переносимого тепла пропорционально $p_1 u_1$. Следовательно, в узловых сечениях стоячей акустической волны как для скорости, так и для давления тепловой поток равен нулю;
- максимальные значения $p_1 u_1$, а значит и \dot{Q} , достигаются вблизи точек с координатой $x=1/4L$ и $x=3/4L$, то есть теплообменные поверхности должны располагаться вне узловых сечений, в местах с максимальным значением произведения $p_1 u_1$;
- влияние поверхности характеризует сомножитель $\Pi\delta_k$, который показывает, что число пластин в стеке надо увеличивать, но так, чтобы зазор между пластинами был не меньше чем $2\delta_k$.

Объем газа, окружающего стек, который участвует в термоакустическом процесса, можно представить как:

$$V = \Pi\delta_k L_s, \quad (1.33)$$

Тогда работа получаемая (или совершаемая), в случае акустического переноса теплоты Q , будет равна:

$$W = \frac{1}{4} \frac{\Pi\delta_k L_s p_1^2 \beta^2 T_m}{\rho_m c_p} (\Gamma - 1), \quad (1.34)$$

Учитывая, что акустическая волна имеет циклическую частоту $\omega = 2\pi f$, то за один цикл будет затрачено количество теплоты \dot{Q} для получения работы:

$$\dot{W} = \frac{1}{4} \omega \frac{\Pi\delta_k L_s p_1^2 \beta^2 T_m}{\rho_m c_p} (\Gamma - 1), \quad (1.35)$$

Предположим, что термоакустическая система замкнутая, энергообмен ограничивается только количеством теплоты (1.32) необходимым для совершения работы (1.35). Так же исходя из условия наличия короткого стека, количество теплоты не зависит от координаты x . Таким образом, КПД термоакустического двигателя находится следующим образом:

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}} = \frac{L_s \beta \omega p_1}{\rho_m c_p u_1}; \quad (1.36)$$

1.5 Резонатор Гельмгольца

Резонатор Гельмгольца - устройство состоящее из сосуда, снабженного горлышком - узким отростком, через которое сосуд сообщается с окружающей средой. При перемещении среды, заполняющей горлышко, в одну сторону и в другую сторону среда испытывает сжатия и разрежения, и давление в ней изменяется. На открытом же конце горлышка давление все время остается неизменным (атмосферным - для резонатора Гельмгольца в воздухе). Разность давлений на концах горлышка ускоряет массу среды внутри него. Ввиду узости горлышка скорость движения среды в нем велика по сравнению со скоростью среды внутри сосуда, так что кинетическая энергия сосредоточена в горлышке, несмотря на то, что фактическая масса среды в горлышке много меньше массы среды в сосуде. Упругая же энергия окажется сосредоточенной в среде внутри сосуда.

Таким образом, кинетическая и потенциальная энергия локализируются в разных телах: в среде в горлышке и в среде в сосуде. Значит резонатор Гельмгольца можно считать осциллятором с сосредоточенными параметрами.

Рассчитаем собственную частоту такого резонатора. Если длина горлышка много больше его поперечного сечения, то среда в нем движется как целое, и можно принять за обобщенную координату смещение ξ частиц в горлышке наружу. Обобщенной массой будет масса среды, заполняющая горлышко:

$$m = SL\rho, \quad (1.37)$$

где S - площадь сечения горлышка, L - его длина, ρ - плотность среды. Степень сжатия среды в сосуде, соответствующая смещению ξ :

$$\varepsilon = \frac{S\xi}{V}, \quad (1.38)$$

где V - объем сосуда. Значит давление, возникающее в сосуде, равно:

$$p = -\frac{S\xi}{\beta V}, \quad (1.39)$$

где $\beta = \frac{1}{\rho a^2}$ - сжимаемость, характеризующая способность среды сжиматься под воздействием давления. Таким образом, обобщенная сила, действующая на обобщенную массу, равна:

$$F = pS = -\frac{S^2\xi}{\beta V}, \quad (1.40)$$

откуда находим обобщенный коэффициент упругости осциллятора в виде:

$$\varkappa = -\frac{F}{\xi} = \frac{S^2}{\beta V}, \quad (1.41)$$

Используя выражение определяющее сжимаемость и формулу для нахождения частоты гармонического осциллятора, получаем искомую резонансную частоту колебаний:

$$f = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L \cdot V}}, \quad (1.42)$$

С помощью данного выражения находится частота возбуждаемых в резонаторе акустических колебаний.


2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА



2.1 Описание установки

Лабораторная установка приведена на рисунке 2.1, она включает в себя: измеритель-регулятор двухканальный ОВЕН 2ТРМ1, блок питания, стеклянную плоскодонную колбу (резонатор Гельмгольца), регенератор,

микрофон, штатив. На рисунке 2.2 представлена электрическая схема данной установки. Геометрия колбы представлена на рисунке 2.3.

Для определения температур на концах регенератора используется измеритель-регулятор двухканальный ОВЕН 2ТРМ1, представленный на рисунке 2.4.

Кнопка  предназначена для входа в режим программирование, а также для записи новых установленных значений в энергонезависимую память прибора.

Кнопки  и  предназначены для смены канала (T_1 , T_2 или ΔT), выводимого на индикацию.

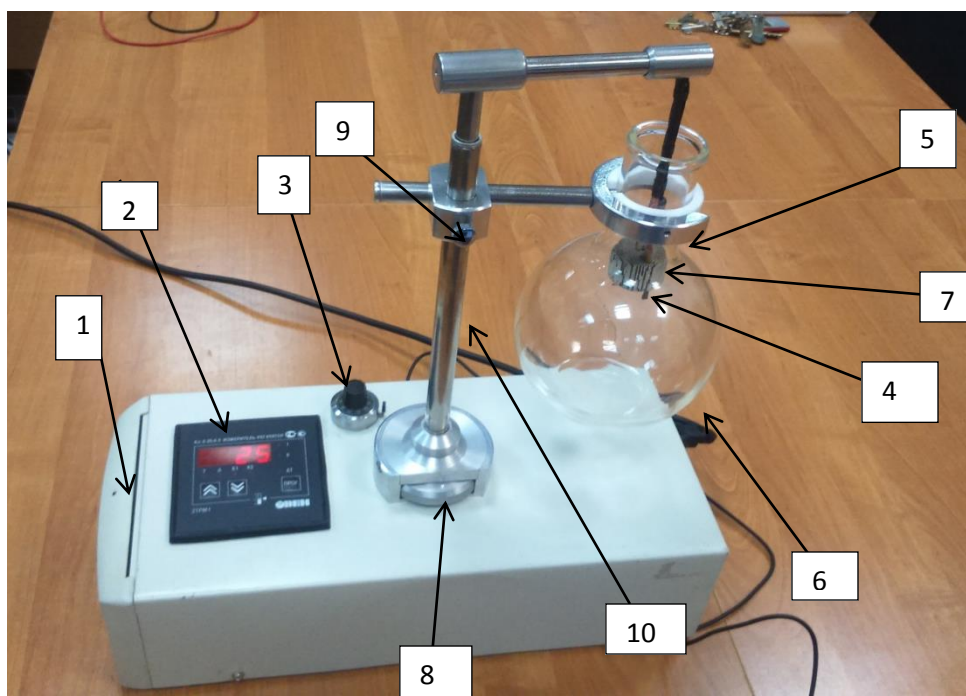


Рисунок 2.1–лабораторная установка

1–Индикатор питания, 2– Измеритель регулятор 2ТРМ1, 3–Реостат, 4–Нагреватель, 5–Микрофон, 6–Колба, 7–Регенератор, 8–Тонкая настройка высоты штатива, 9–Грубая настройка высоты штатива, 10–Штатив.

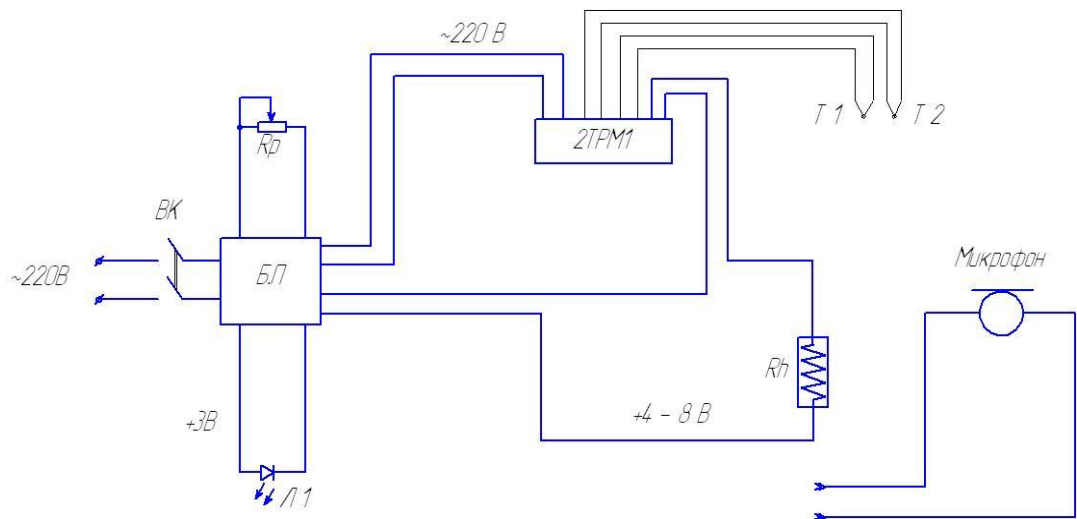


Рисунок 2.2-электрическая схема лабораторной установки:

М -Микрофон, Rh –Нагреватель, BK–Выключатель питания, 2ТРМ1-Регулятор измеритель, Б.П–Регулируемый блок питания, Rp–Реостат, Л1–Светодиодный индикатор, Т1,Т2– Хромель-капельные термопары

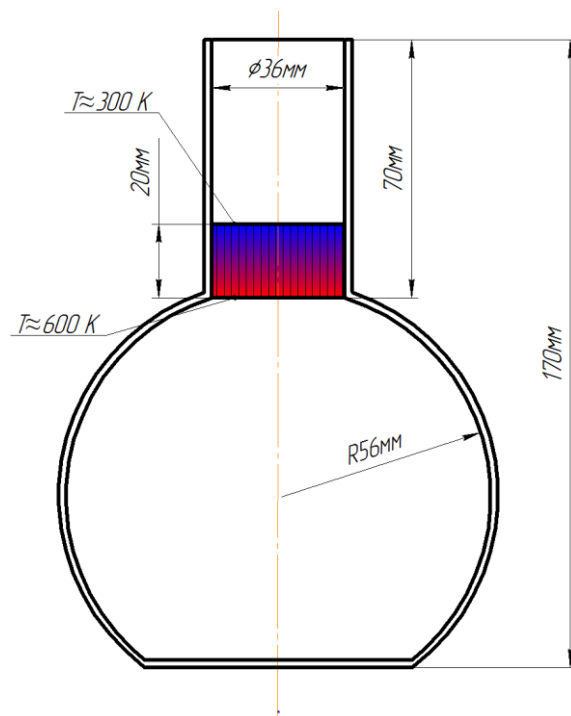


Рисунок 2.3 - Геометрия колбы (резонатора Гельмгольца)



Рисунок 2.4– измеритель-регулятор 2TRM1

2.2 Описание программы Sound Card Oscilloscope

Осциллограф– прибор, предназначенный для исследования, наблюдения, измерения амплитудных и временных интервалов.

Программа включает в себя:

1– двухканальный осциллограф с частотой пропускания (зависит от звуковой карты) не менее чем от 20 до 20000 Гц;

2– двухканальный генератор сигналов с аналогичной генерируемой частотой;

3– анализатор спектра;

4–возможность записи звукового сигнала для его последующего изучения;

На рисунке 2.5 представлено рабочее окно программы, где:

1 – Amplitude - регулировка чувствительности канала вертикального отклонения;

2 – Sync– позволяет (установив или сняв галочку) производить отдельную, или одновременную регулировку двух каналов по амплитуде сигналов;

3, 4 – позволяет разнести сигналы по высоте экрана для их индивидуального наблюдения;

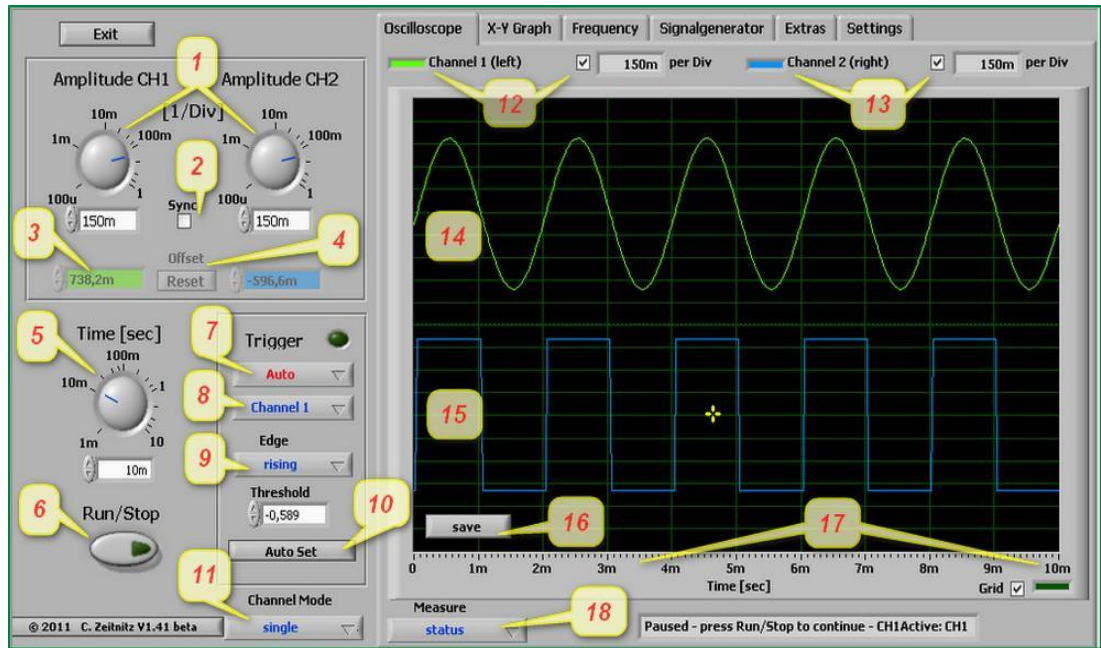


Рисунок 2.5 – окно программы SoundCard Oscilloscope

5 – установка времени развертки;

6 – запуск/остановка работы осциллографа. При остановке на экране сохраняется текущее состояние сигналов, а также появляется кнопка Save (16) позволяющая сохранить текущее состояние на компьютере в виде 3-х файлов (текстовые данные исследуемого сигнала, черно-белое изображение и цветное изображение картинки с экрана осциллографа в момент остановки)

7 – Trigger – программное устройство, которое задерживает запуск развертки до тех пор, пока не будут выполнены некоторые условия и служит для получения стабильного изображения на экране осциллографа. Имеется 4 режима:

а) – включение/выключение. При выключенном триггере, изображение на экране будет выглядеть “бегущим” или даже “размазанным”;

б) – автоматический режим. Программа сама выбирает режим (нормальный или одиночный);

в)– нормальный режим. В этом режиме осуществляется непрерывная развертка исследуемого сигнала;

г)– одиночный режим. В этом режиме осуществляется одноразовая развертка сигнала (с промежутком времени, установленным регулятором Time).

8 – выбор активного канала

9 – Edge – тип запуска сигнала:

а)- rising – по фронту исследуемого сигнала;

б)– falling – по спаду исследуемого сигнала;

10 – AutoSet – автоматическая установка времени развертки, чувствительности канала вертикального отклонения Amplitude, а также изображение выгоняется в центр экрана;

11 -ChannelMode – определяет, как будут выводиться сигналы на экран осциллографа:

single – раздельный вывод двух сигналов на экран;

CH1 + CH2 – вывод суммы двух сигналов;

CH1 – CH2 – вывод разницы двух сигналов;

CH1 * CH2 – вывод произведения двух сигналов;

12 и 13 – выбор отображения на экране каналов (или любой из двух, или два сразу, рядом изображается величина Amplitude);

14 – вывод осциллограммы канала 1;

15 – вывод осциллограммы канала 2;

17 – шкала времени (у нас регулятор Time стоит в положении 10 миллисекунд, поэтому шкала отображается от 0 до 10 миллисекунд);

18 – Status – показывает текущее состояние триггера а также позволяет выводить на экран следующие данные:

NZandVolts – вывод на экран текущей частоты напряжения исследуемого сигнала

cursor – включение вертикальных и горизонтальных курсоров для измерения параметров исследуемого сигнала;

Log to File – посекундная запись параметров исследуемого сигнала.

3 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

1) С помощью грубой настройки высоты штатива переместить стэк в положение, как показано на рисунке 3.1а.

2) Перевести регулятор тонкой настройки высоты штатива, так чтобы регулировочная метка располагалась по середине открытой части регулировочного колеса. (см. рис. 3.1б).

3) Подключить кабель питания к сети 220V.



а)

б)

Рисунок 3.1 - Начальное положение регулируемых элементов:

а) стэк; б) тонкая регулировка штатива

4) Подключить кабель Jack 3,5mm в разъем для микрофона к ноутбуку с установленным программным обеспечением, описанным в разделе 2.2 и запустить его.

5) Обеспечить подачу воды для охлаждения стэка. Для этого необходимо повернуть кран подачи воды, после чего обязательно проверить наличие утечек.

6) С помощью кнопок  и  перевести измеритель-регулятор в режим индикации температуры горячего конца стэка (T_1).

7) Запустить установку переводя переключатель со стороны кабеля питания из положение 0 в положение 1.

8) В момент, когда установка прогреется и на стенках стэка выстроится необходимый градиент температур, появится характерный звук, после чего необходимо записать значение температуры горячего теплообменника, частоты выдаваемого звукового сигнала и амплитуду сигнала.

9) Выключить установку и дать ей остыть до полного выравнивания температур на концах стэка. Это осуществляется переводом измерителя-регулятора в режим индикации температурной разницы между горячей и холодной сторонами стэка ΔT .

10). Произвести 10 оборотов регулятора тонкой настройки по часовой стрелке. После чего стэк должен располагаться выше на расстояние равное своей длине (в соответствии с рисунком 3.2.).



Рисунок 3.2 - Расположение стэка во втором опыте

11) Повторить действия в соответствии с пунктами 6-11.

12) Занести все результаты в бланк регистрации экспериментальных данных (таблица 1).

Таблица 1 - Бланк регистрации экспериментальных данных

№	$f_{\text{эксп}}$, Гц	T_2 , К	$P_{\text{эксп}}$, Дб(Па)
1			
2			
3			

4 ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1) Рассчитать значение собственной частоты резонатора по формуле (1.42). Геометрию резонатора взять из рисунка 2.3. Произвести сравнение с экспериментальным значением, объяснить расхождения.

2) Построить зависимости $P_{\text{эксп}}(x)$, $T_2(x)$ и $f_{\text{эксп}}(x)$. При этом за x принимается положение стэка, для начального положения соответственно $x=0$. Объяснить физический смысл полученной зависимости.

3) Необходимые для дальнейшего расчета теплофизические характеристики воздуха представлены в таблице 2. Амплитуду давления принимаем 40 Па, а амплитуду колебательной скорости 0,1 м/с, за рабочую частоту принимаем экспериментальное значение частоты.

Таблица 2 - Теплофизические свойства воздуха

β , [-]	c_p , [$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$]	ρ_m , [$\text{кг}/\text{м}^3$]	κ , [$\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$]
$0,3665 \cdot 10^{-2}$	1005	1,19	0,03

4) Используя формулы (1.11), (1.21), (1.22) рассчитать нормализованный градиент температуры.

5) Используя (1.28) и схему представленную на рисунке 4.1, рассчитать объем газа участвующего в процессе в пределах одного канала.

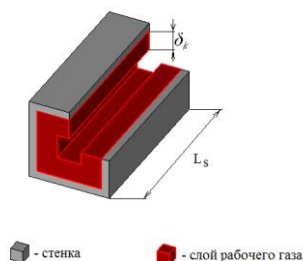


Рисунок 4.1 - Схема расчета объема газа участвующего в цикле

6) Исходя из того, что для заданного стэка $\varepsilon = \frac{A_{\text{пор}}}{A_{\text{полная}}} = 0,64$, подсчитать общее число каналов и общий объем газа участвующего в процессе.

7) По формулам (1.32), (1.34) и (1.36) рассчитать количество теплоты участвующей в термоакустическом цикле, получаемую работу и КПД установки.

8) Результаты свести в бланк регистрации расчетных данных. (см. таблица 3)

Таблица 3 - Бланк регистрации расчетных данных

Г	$V_{\text{общ}}, \text{м}^3$	Q, Дж	W, Дж	η

5 СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 1) Принципиальная схема установки.
- 2) Заполненный бланк регистрации экспериментальных данных для трех положений стэка.

3) Расчет, сравнение и объяснение расхождения собственной частоты с экспериментальной рабочей.

4) Графики полученных зависимостей.

5) Заполненный бланк регистрации расчетных данных.

5) Выводы.

6 ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

6.1 Введение

Основная задача данной лабораторной работы провести численное моделирование термоакустического эффекта с помощью методов вычислительной гидрогазодинамики (CFDметода).

Моделирование включает в себя следующие этапы:

- принятие определенных допущения для упрощения расчета;
- построение расчетной модели в САДсистеме;
- получение сеточной модели из расчетной;
- задание граничных условий на основе принятых допущений;
- расчет полученной конечно-элементной модели;
- визуализация полученных результатов и получение необходимых значений рабочих параметров.

Для данной модели термоакустического преобразователя были приняты следующие допущения:

- рассматривается двухмерная осесимметричная модель;
- рабочее тело воздух как идеальный газ;
- давление на входе в резонатор 1 атм;
- стэк моделируется как система параллельных пластин;

- работа теплообменников моделируется как температурный градиент наложенный на стенки стэка в качестве граничного условия;

6.2 Построение расчетной сеточной модели

Построение осуществляется в программе CFD-GEOM. Ее запуск осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню "Пуск" ОС "Windows":

Пуск → Все программы → ESI Group → CFD-GEOM

В результате этого действия появится окно, изображенное на рисунке 6.1.

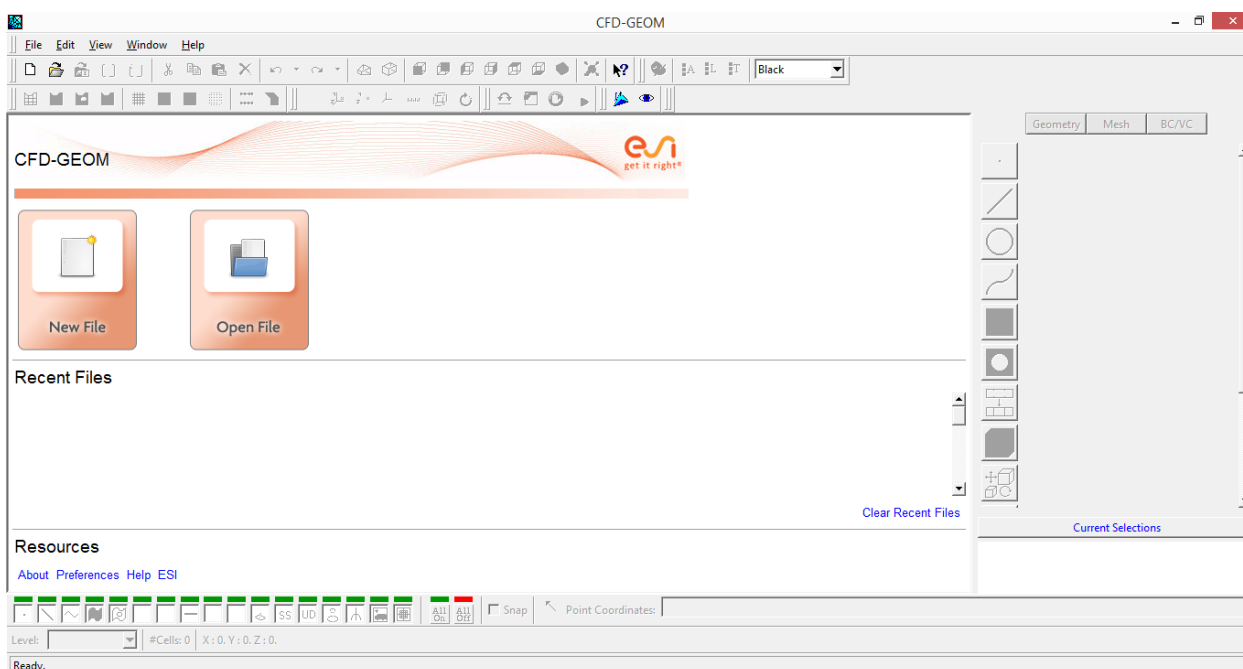


Рисунок 6.1 - Стартовое окно CFD-GEOM

Нажимаем *New File*, после чего появляется окно *New Model*, где в поле *Model Name* вводится название модели, в поле *Directory* указывается рабочая папка, куда будут сохраняться все файлы проекта, в поле *Units* выбираются единицы измерения, в которых будет строиться расчетная модель, в данном случае выбираем *Millimeters*. После этого следует нажать *OK*. Это приведет к появлению окна программы CFD-GEOM. Оно показано на рисунке 6.2.

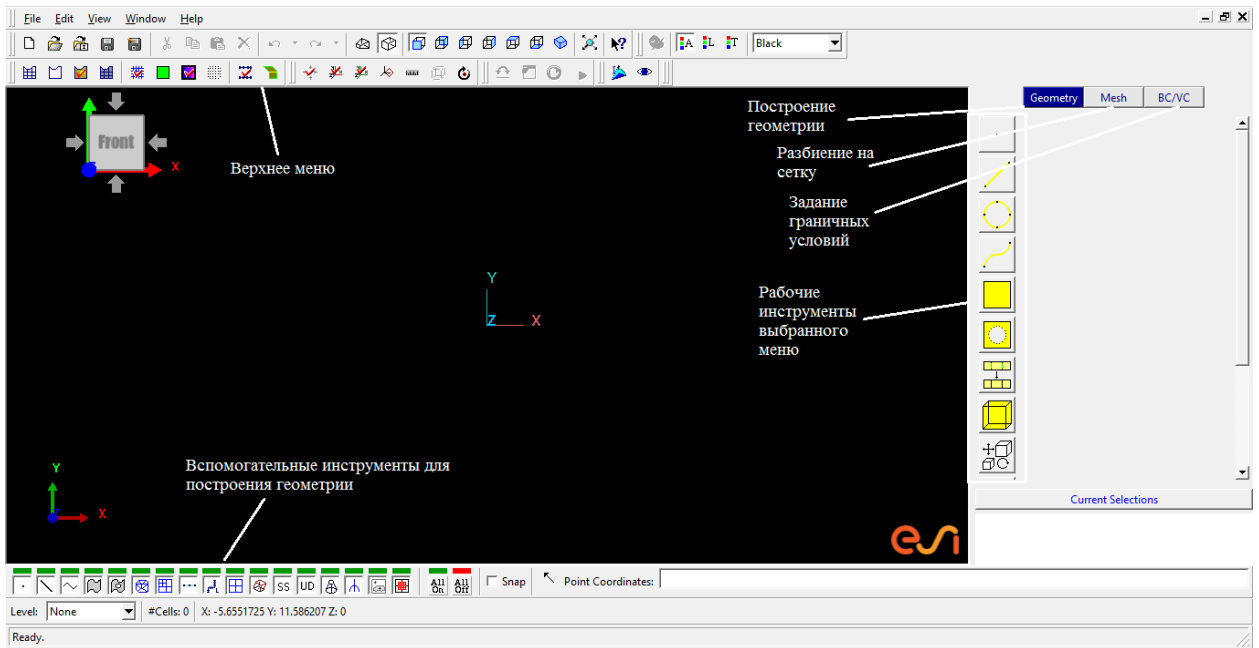


Рисунок 6.2 - Рабочее окно программы CFD-GEOM

Расчетная модель, с учетом указанных выше допущений представлена на рисунке 6.3.

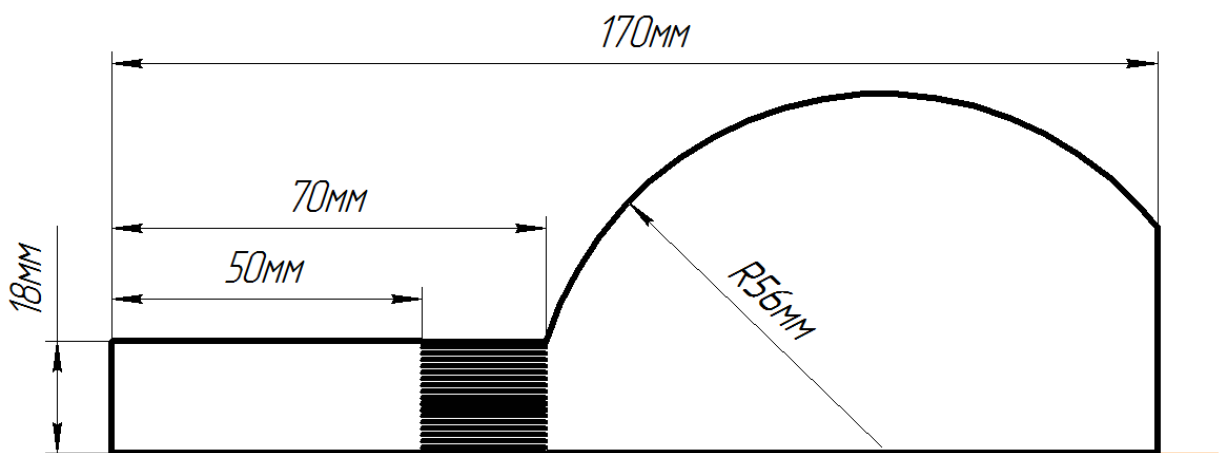


Рисунок 6.3 - Расчетная модель

Построение модели начинается с построения основных точек координаты которых указаны в таблице 6.1. В результате рабочая область должна выглядеть как на рисунке 6.4.

Таблица 4 - Координаты начальных точек для построения

№ точки	X	Y
1	0	0
2	0	18
3	50	0
4	50	18
5	70	18
6	70	0
7	126	0
8	170	0
9	170	18

Построение точек производится с помощью команды *Point Creation Options*→*Coordinates/Screen-Pick* которая находится в рабочих инструментах меню *Geometry*. В поля X, Y вбиваются координаты необходимой точки, после чего нажатием кнопки *Preview* можно осуществить предварительный просмотр, а кнопкой *Apply* подтвердить положение точки. В результате на рабочей области экрана появятся точки представленные на рисунке 6.4.

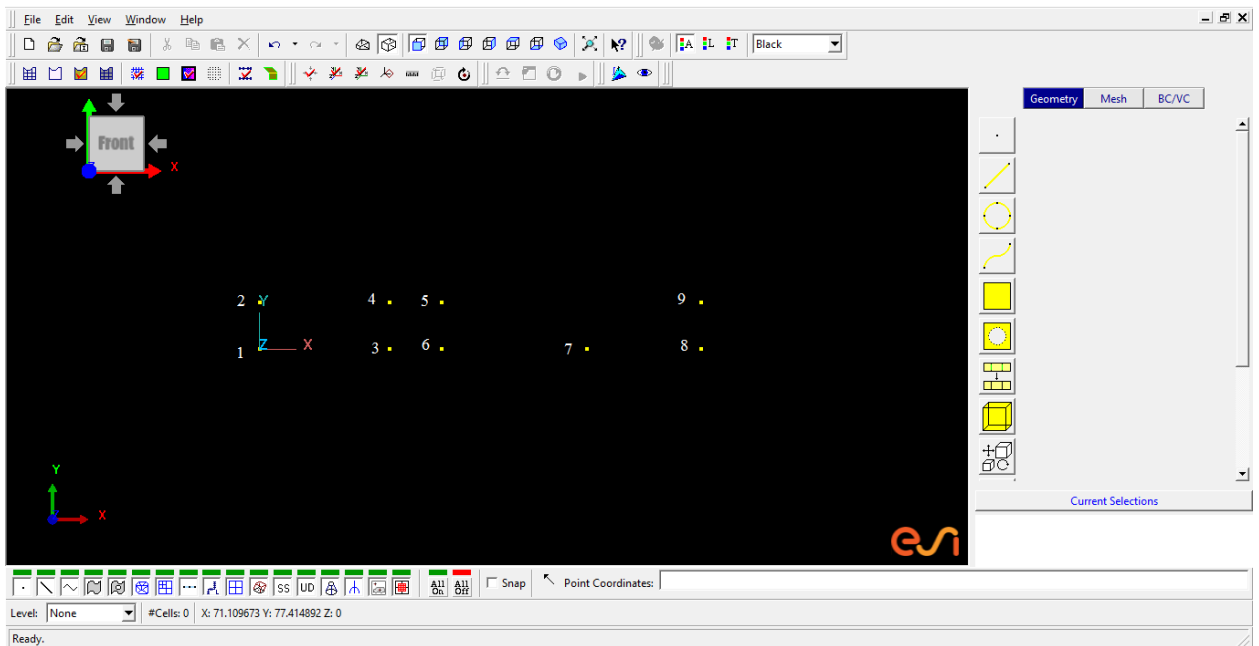


Рисунок 6.4 - Построение начальных точек

Далее, с помощью команды *Conic Creation* → *2-Point Circle* строится окружность, при этом первой выбирается точка 7 (клик левой кнопки мышки на точки, а затем на кнопку колеса), как середина окружности, затем точка 5, как радиус. Далее ставим точку с координатами (170; 50) и с помощью команды *Line Creation* → *Create Line(s)* соединяем ее линией с точкой 9. В результате рабочая область должна выглядеть как на рисунке 6.5.

Следующим шагом, необходимо отсечь лишнюю часть окружности. С помощью команды *Point Creation Options* → *Curve/Curve Intersection* определяем точку пересечения окружности и вспомогательной кривой (левой кнопкой мышки на окружности, а затем на прямую, после чего нажимаем колесико). Выбираем команду *Geometry splitting/joining options* → *Split Curve at Point*, далее левой кнопкой мыши на окружность, и подтверждаем выбор колесиком, после чего левой кнопкой мыши на получившуюся точку пересечения со вспомогательной прямой и точку 5 и еще раз колесико. Аналогичное проделываем со вспомогательной прямой, чтобы разбить ее на две части точкой пересечения с окружностью. После чего удаляем все

лишнее, соединяя точки 9 и 8 линией, так чтобы рабочая область выглядела как на рисунке 6.6.

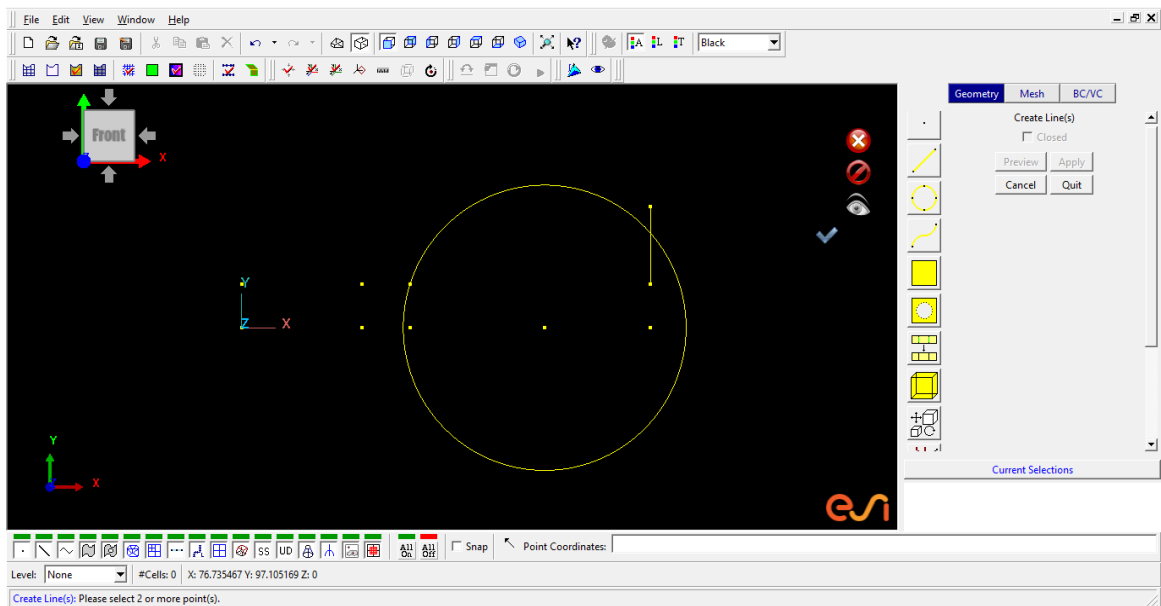


Рисунок 6.5 - Построение вспомогательной геометрии

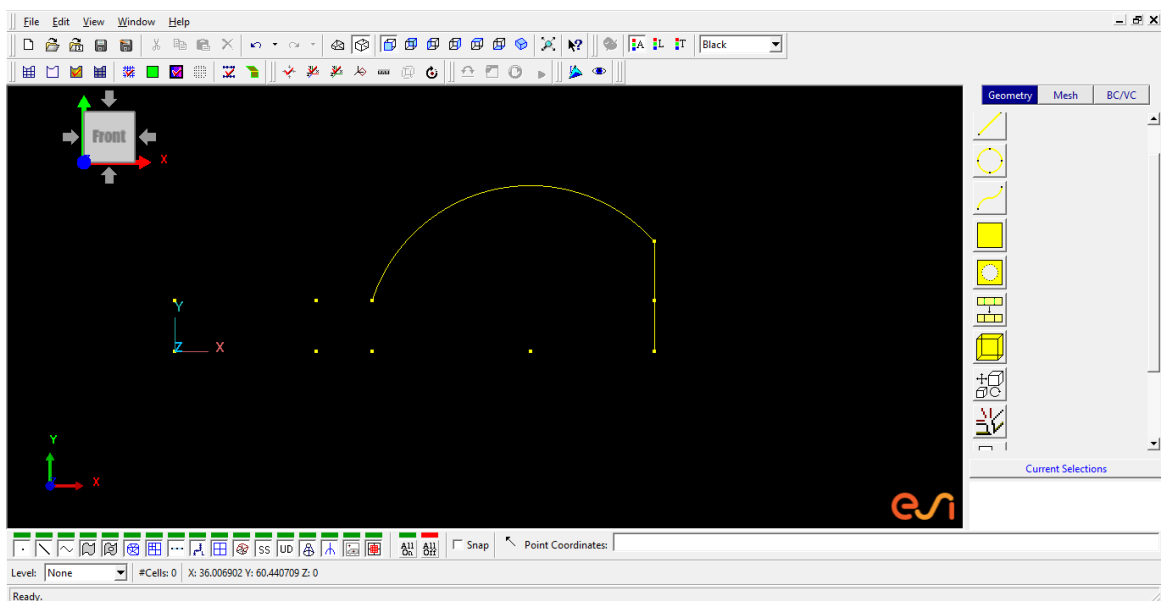


Рисунок 6.6 - Построение вспомогательной геометрии

Ставим точку с координатами (70;40) и соединяем ее с другой точкой прямой, как показано на рисунке 6.7.

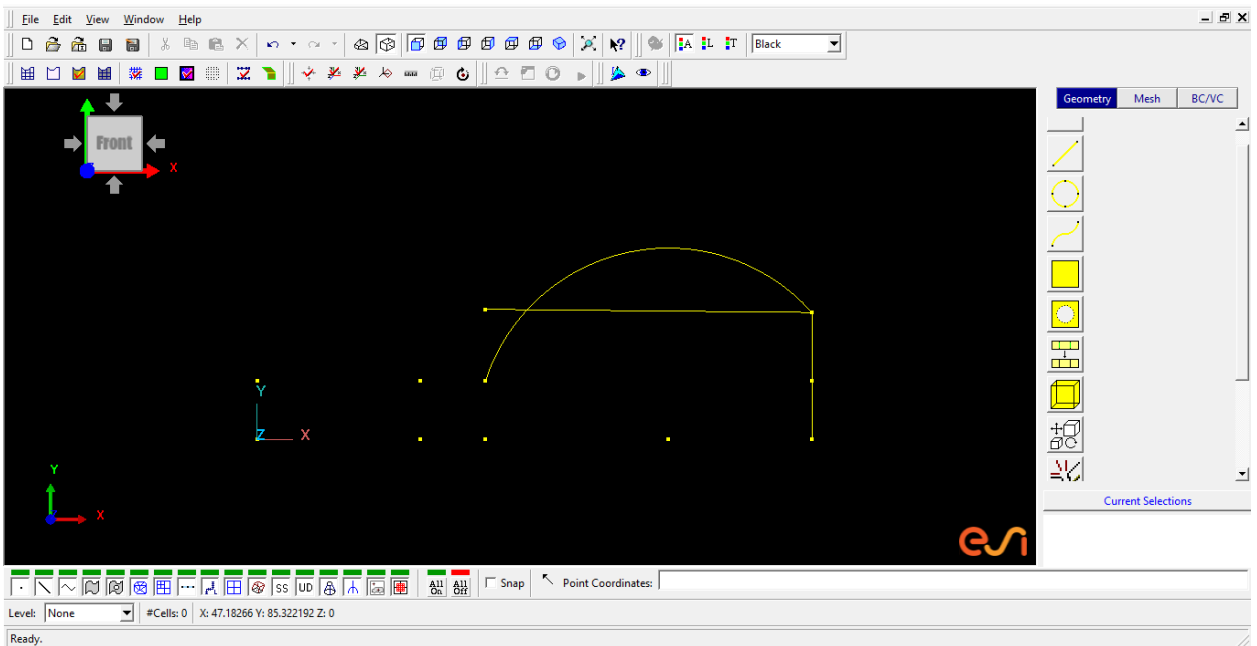


Рисунок 6.7 - Построение вспомогательной геометрии

После чего разбиваем дугу получившейся точкой пересечения ее со вспомогательной прямой, как показано на рисунке 6.8.

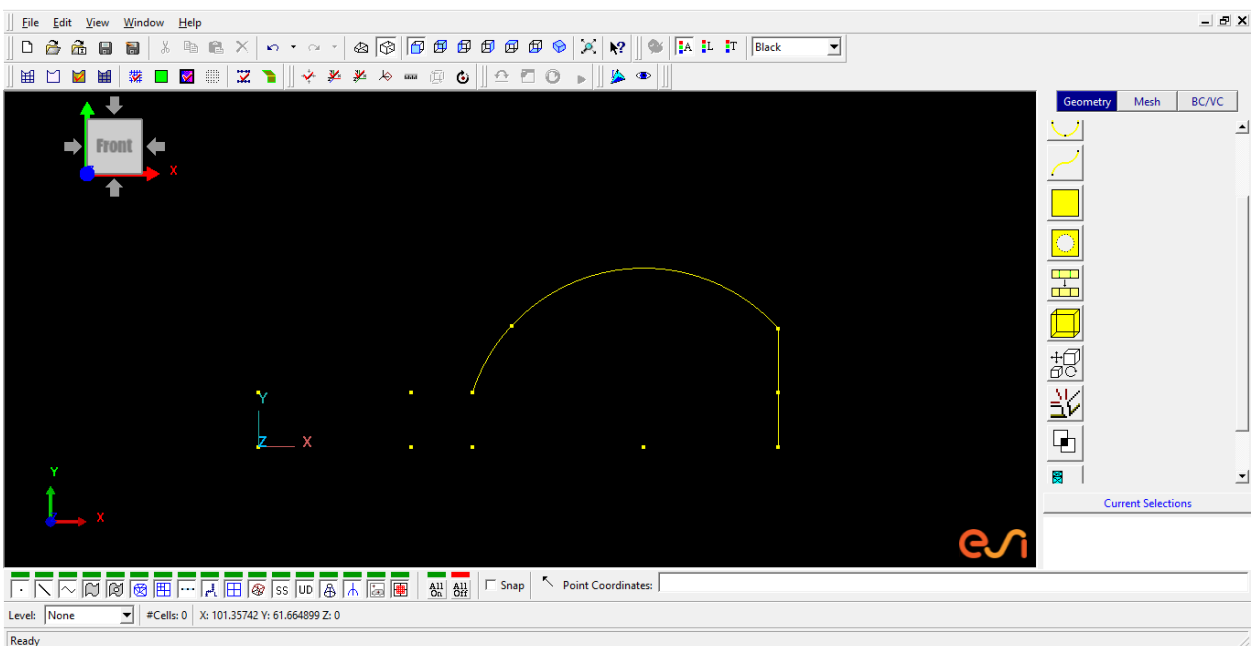


Рисунок 6.8 - Построение вспомогательной геометрии

Соединяем оставшиеся точки как показано на рисунке 6.9.

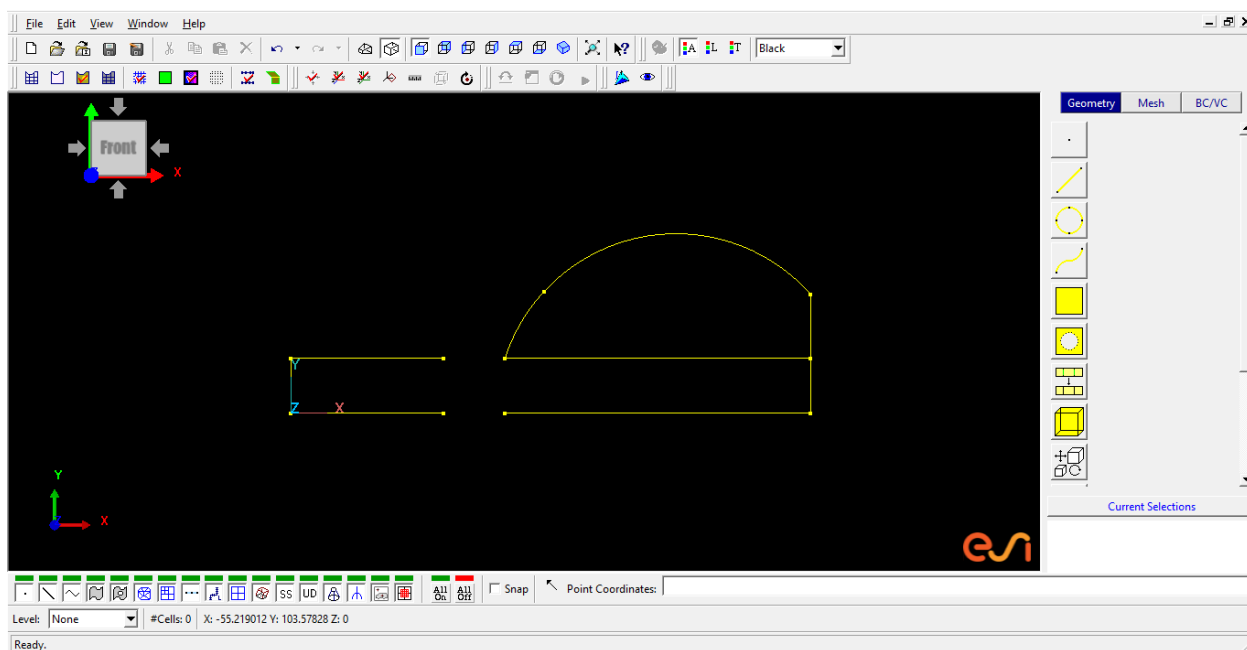


Рисунок 6.9 - Построение основной геометрии

Построение стэка начинается с построения 4 точек, координаты которых представлены в таблице 5.

Таблица 5 - Координаты точек для построения стэка

№ точки	X	Y
1	50	0,1
2	50	0,9
3	70	0,1
4	70	0,9

Полученные точки соединяются линиями, так чтобы получился прямоугольник, как показано на рисунке 6.10.

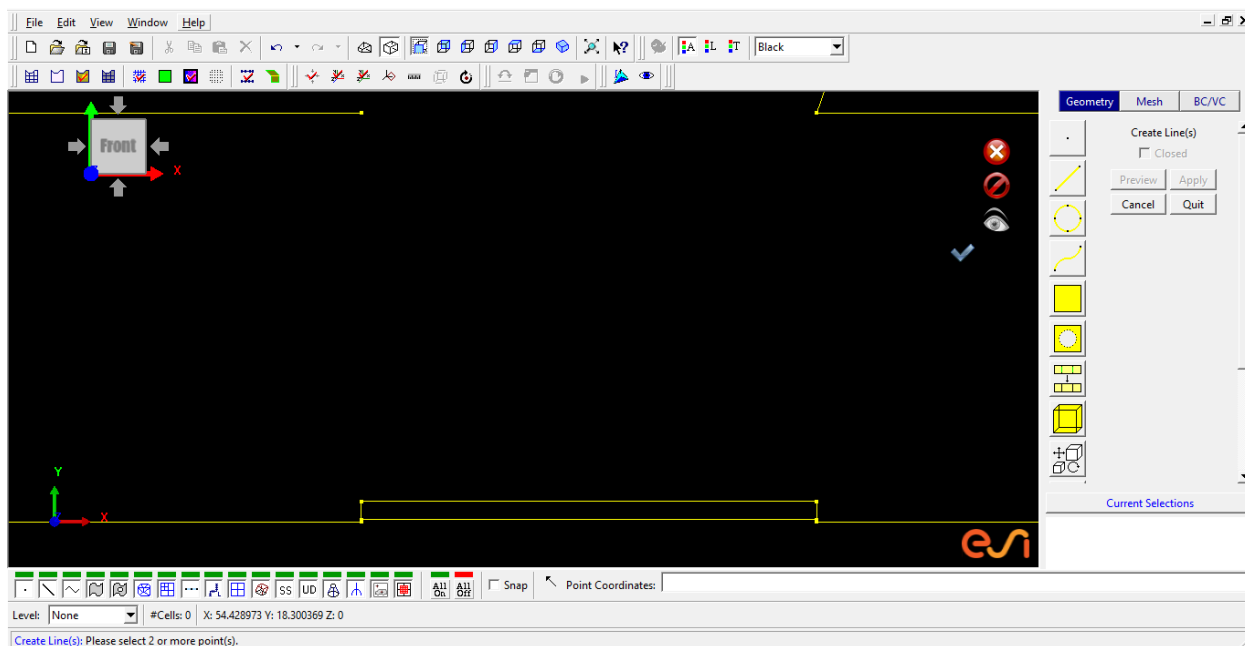


Рисунок 6.10 - Построение стэка

Для удобства создания сеточной модели, области течения между пластинами стэка, сразу разбиваются на сетку. Разбиение начинается с создания узловых точек на граничных линиях поверхности. Для этого переходим в меню *Mesh*, выбираем команду *Edge options* → *Create/Edit Edge*, указываем одну из боковых сторон прямоугольника и заполняем поля согласно рисунку 6.11, после чего ждем *Apply* или колесико мышки и выполняем аналогичную операцию для противоположной боковой стороны прямоугольника.

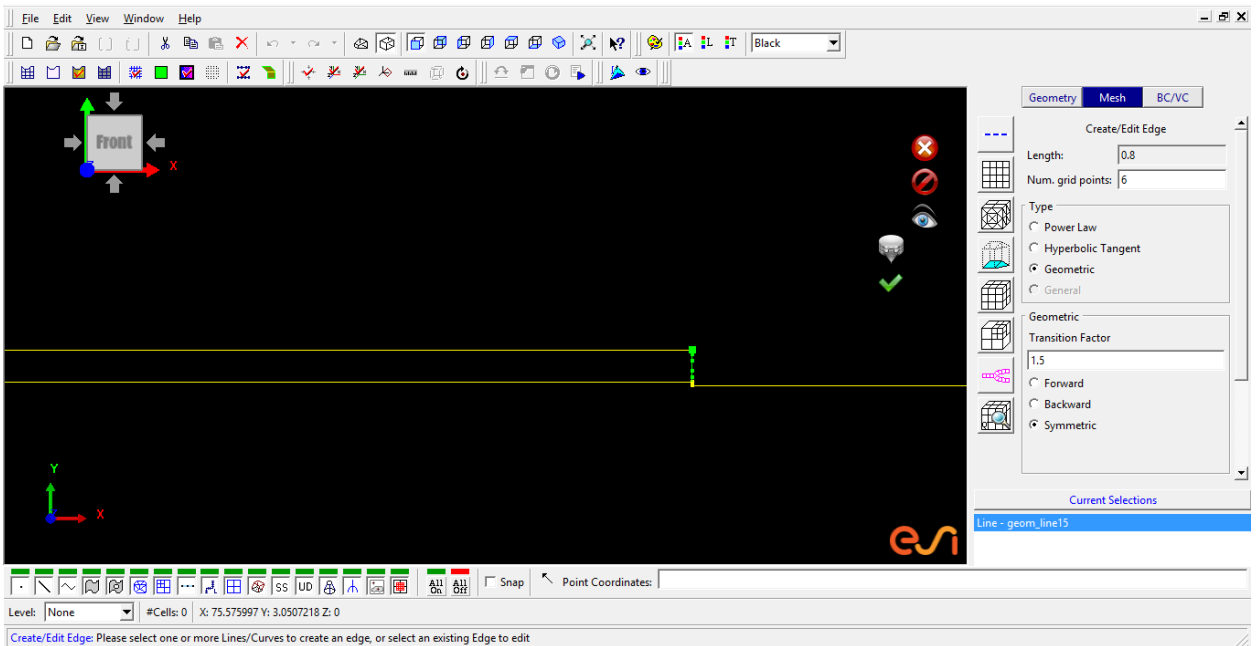


Рисунок 6.11 - Построение стэка

На следующем этапе разбиваются верхние и нижние стороны прямоугольника, без дополнительных распределений, число точек задается 20, в результате картина должна выглядеть как на рисунке 6.12.

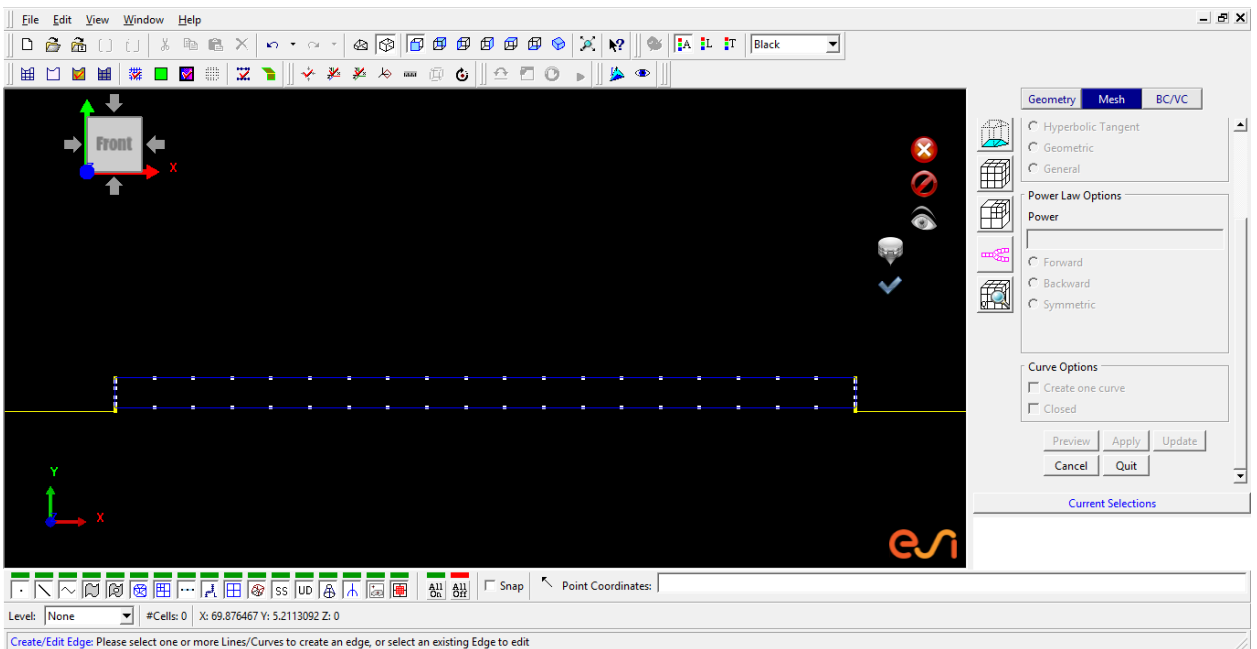


Рисунок 6.12 - Построение стэка

С помощью функции *Structured Face Options* → *Face From Edges* собирается плоская сеточная область, для этого выделяется и подтверждается (клик левой, затем колесико) каждая из сторон прямоугольника. Основное правило для построения структурированной сеточной области состоит в том, чтобы число точек на противоположных линиях должно быть одинаковым, иначе область не замкнется. В результате должна получиться сеточная область, как показано на рисунке 6.13.

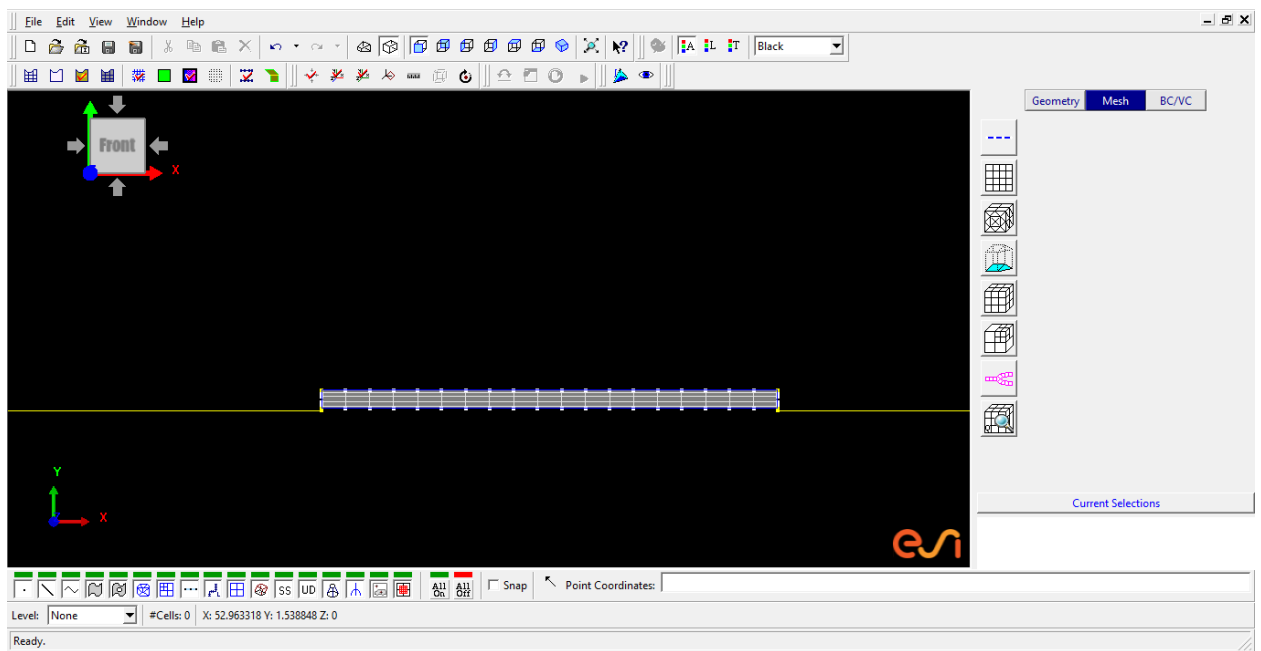


Рисунок 6.13 - Построение стэка

Возвращаемся в меню *Geometry* и выбираем команду *Transform or Duplicate/Transform Entities* → *Translate* указываем получившуюся сеточную область, в меню *Direction* выбираем *y*, отмечаем *Duplicate*, в поле *Distance* оставляем 1, в поле *Times* указываем 17 - число копий областей течения стэка заполняющих горло резонатора. В результате область построения должна выглядеть как показано на рисунке 6.14.

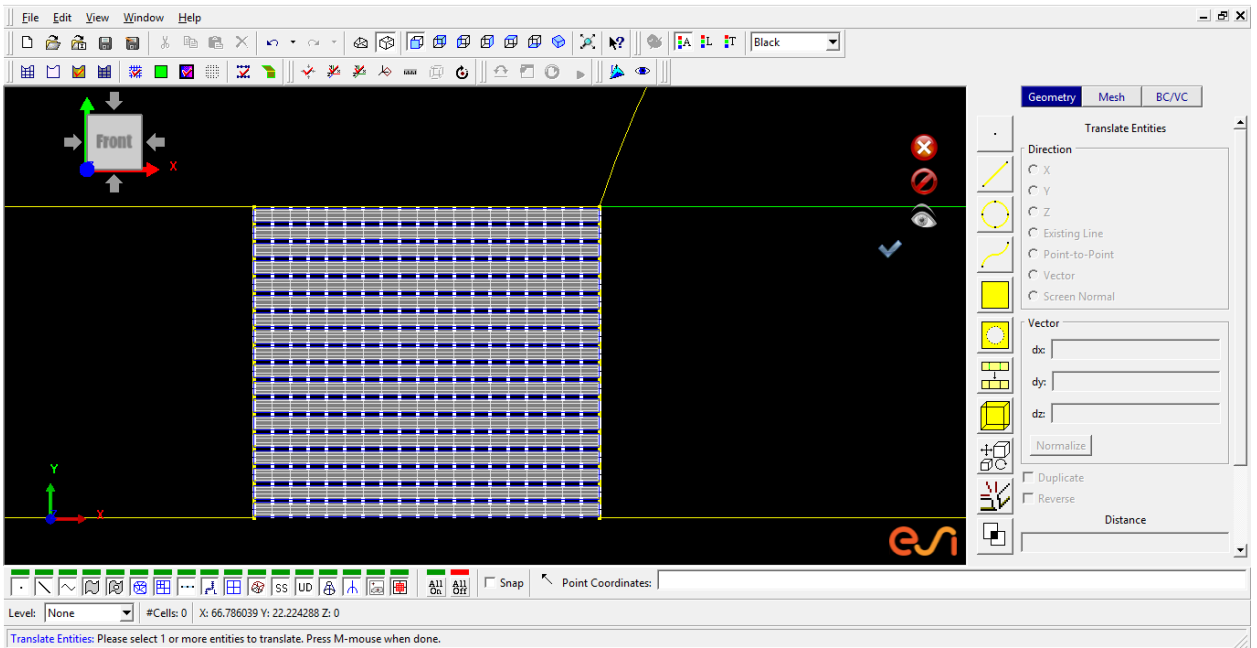


Рисунок 6.14 - Построение стэка

На следующем этапе работы необходимо соединить каждый прямоугольник линиями, а соединяющие их линии разбить на две точки каждую, методом который был использован для разбиения сторон прямоугольника, как показано на рисунке 6.15.

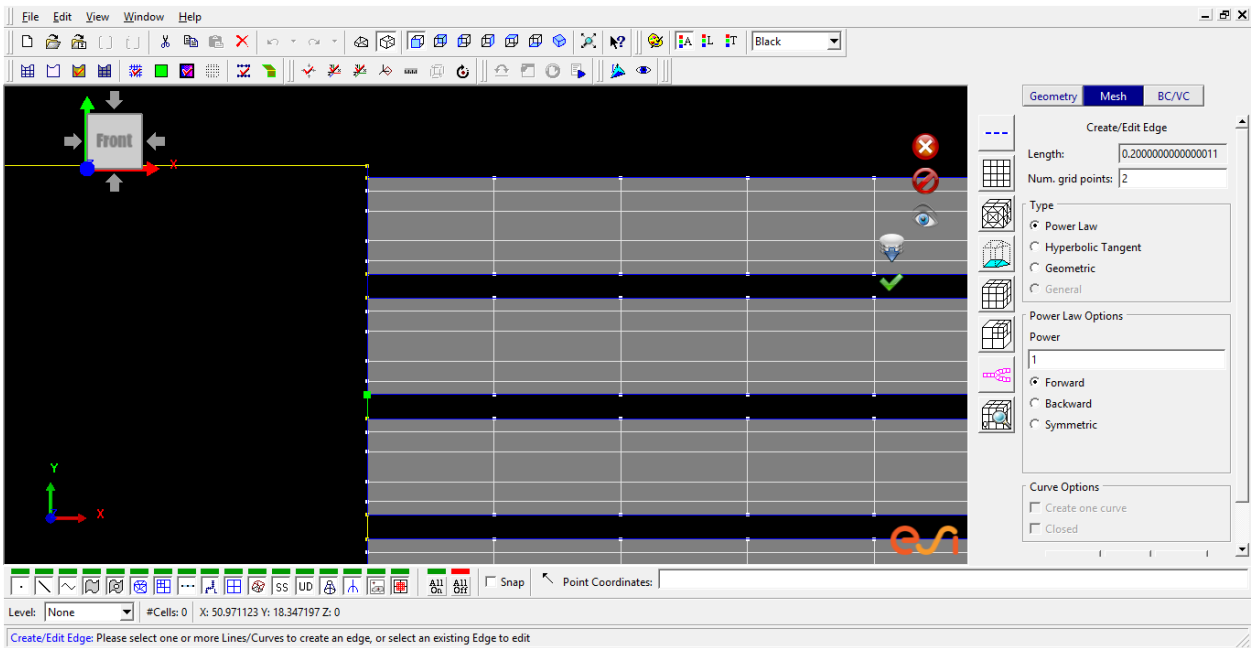


Рисунок 6.15 - Построение стэка

После чего все оставшиеся линии разбиваются на точки. Количество точек для каждой линии указано на рисунке 6.16.

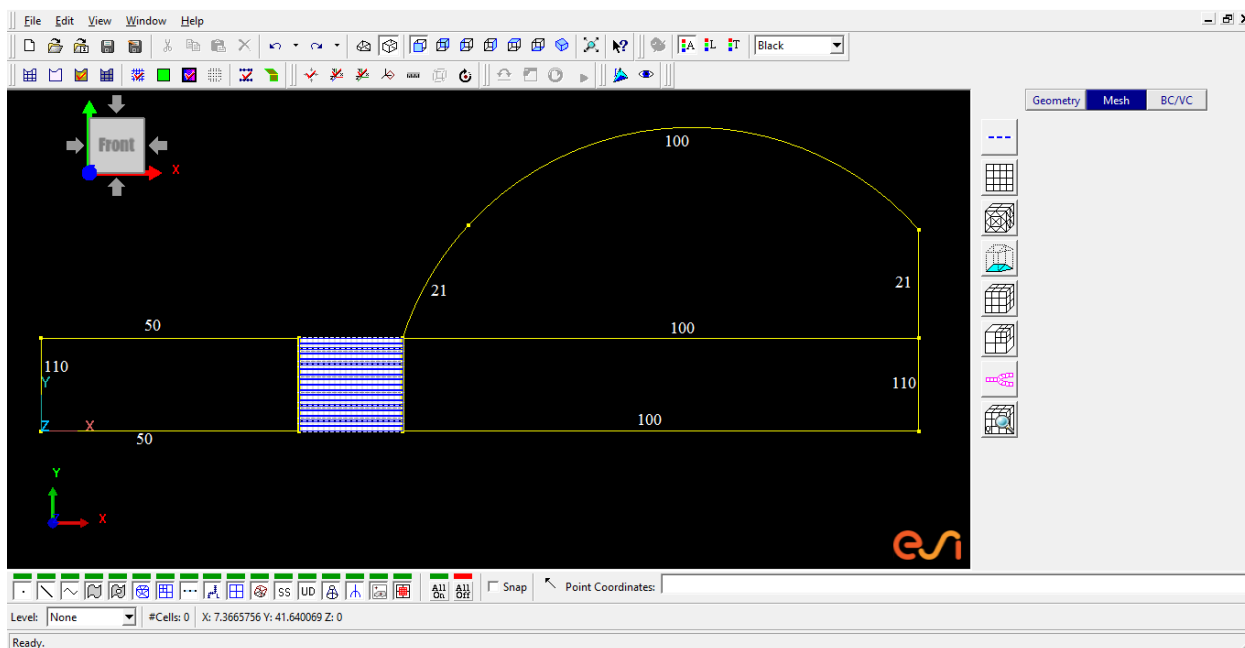


Рисунок 6.16 - Число точек разбиения оставшихся линий

Следующим шагом все получившиеся линии объединяются в отдельные сеточные области. Важно понимать, что сеточная область обязательно должна состоять из 4 сторон, таким образом чтобы число разбиений на противоположных сторонах было одинаковым, и сторона может состоять и отдельных линий. Конечная сеточная модель показана на рисунке 6.17.

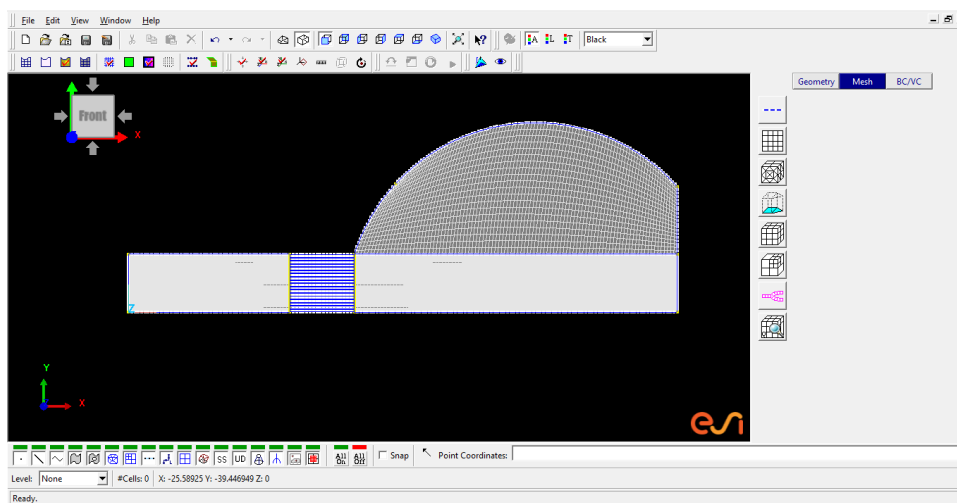


Рисунок 6.17 - Сеточная модель

Далее создаются отдельные расчетные 2-Dблоки с помощью команды *Structured and Semi-Structured Domain Options* → *Create 2-D Block* в меню *Mesh*. Для этого необходимо кликнуть левой кнопкой мышки, а затем кнопкой колеса мыши, на каждую сеточную область, так чтобы в результате она перекрасилась из серого цвета в фиолетовый, как показано на рисунке 6.18.

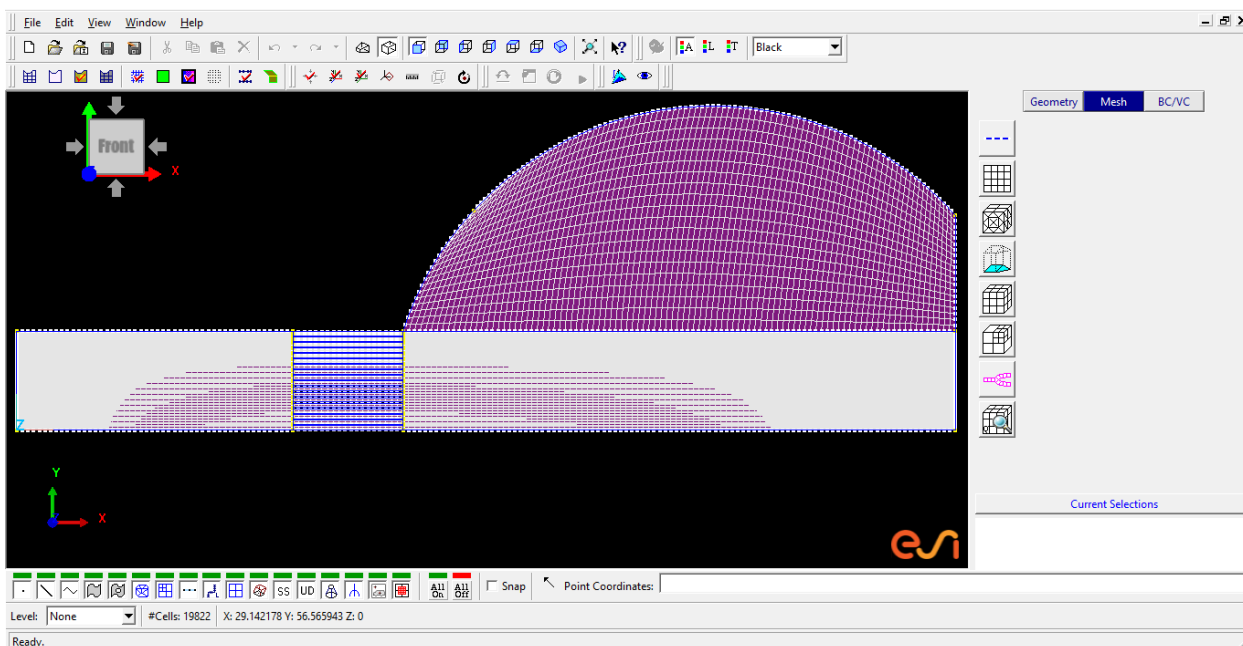


Рисунок 6.18 - Конечная расчетная сеточная модель

В меню *BC/VC* выбираем *Boundary conditions*, после задаются граничные условия *Inlet* и *Symmerty*, как указано на рисунках 6.19 и 6.20 соответственно.

На этом этапе построение расчетной модели завершается. Для дальнейшей работы с моделью следует сохранить сначала файл в формате GGD (файл сеточной области), а затем в формате DTF (файл для работы в процессоре CFD-ACE+). Это осуществляется с помощью выполнения следующих действий, *File* → *Save as*, за счет изменения формата в поле *File Type*.

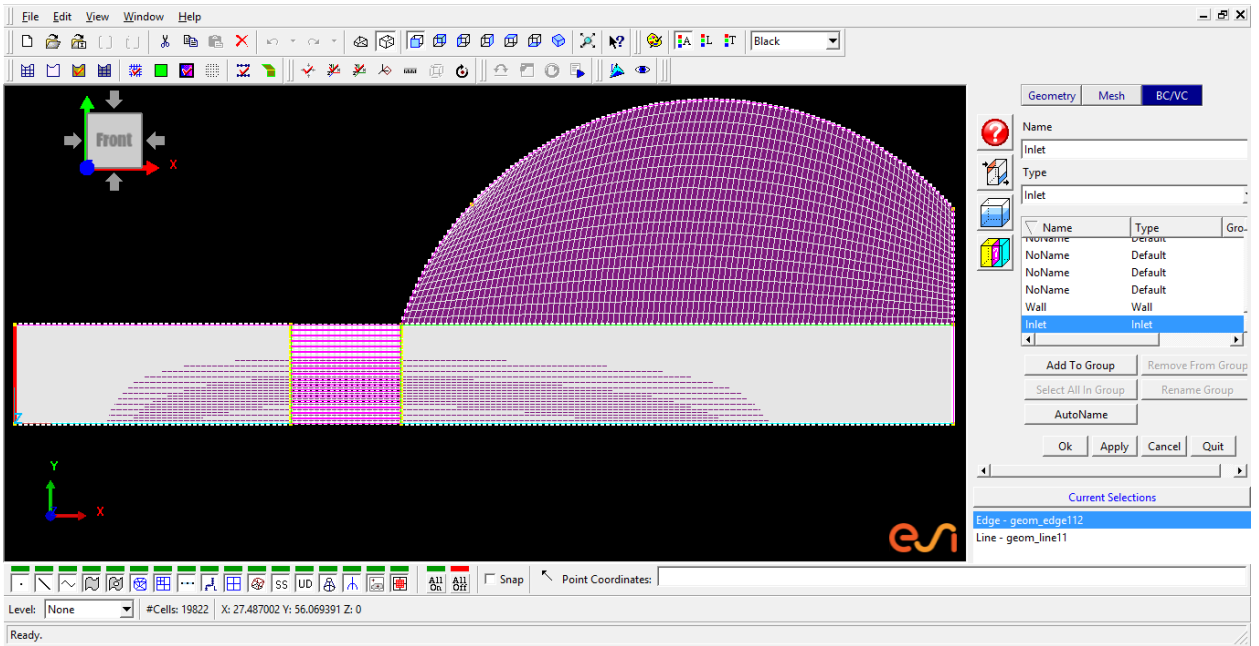


Рисунок 6.19 - Задание граничного условия *Inlet*

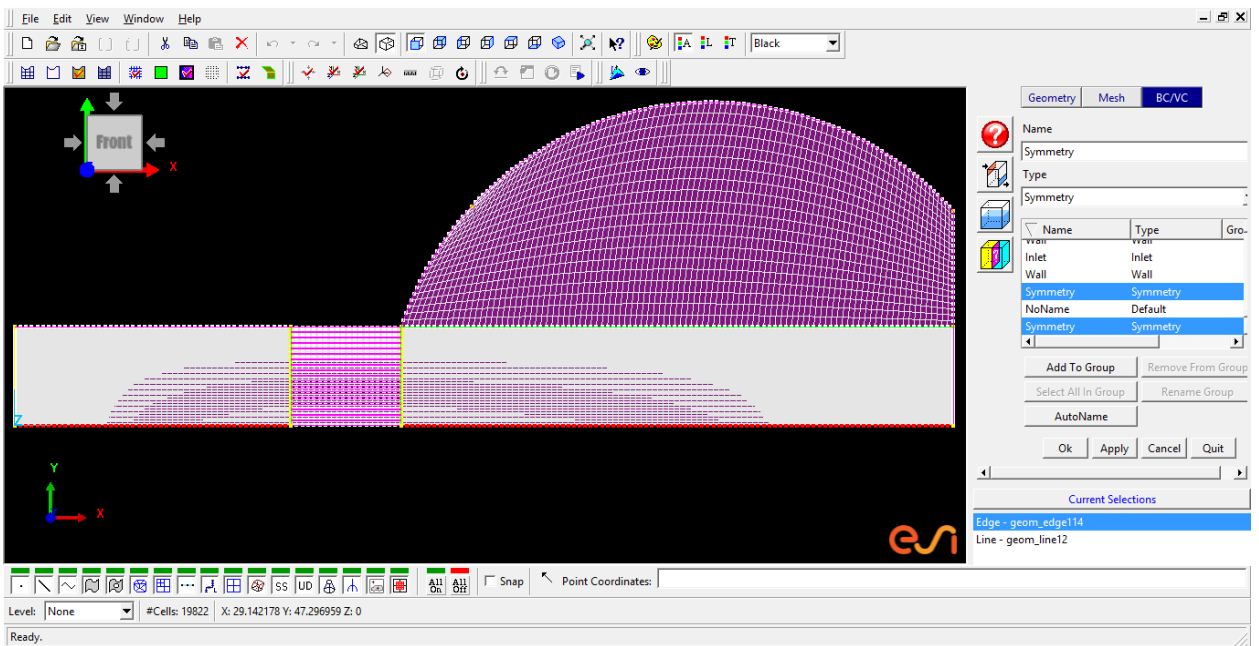


Рисунок 6.20 - Задание граничного условия *Symmetry*

6.3 Расчет рабочих процессов термоакустического преобразователя в CFD-ACE

Настройка расчета выполняется в программе CFD-ACE. Ее запуск осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе компьютера или из меню "Пуск" ОС "Windows":

Пуск → Все программы → ESI Group → CFD-ACE

В результате этого действия появится окно, изображенное на рисунке 6.21. Заходим в *File → Open* и находим папку, в которой сохранен *DTF* файл, после чего открываем его.

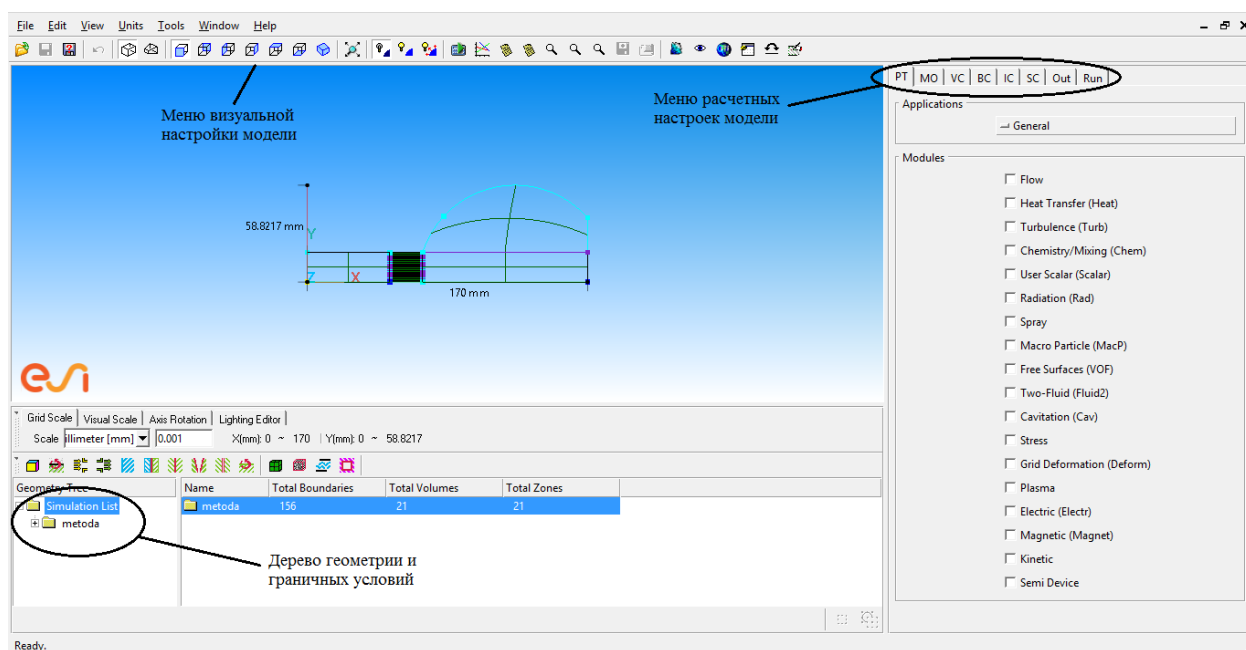


Рисунок 6.21 - Рабочее окно CFD-ACE

Настройка задачи начинается с выбора расчетных модулей в меню *Problem Type*, которые определяют решаемую систему уравнений. В данном случае ставится галочка в окне *Modules* напротив опции *Flow*, которая включает в решаемые задачи уравнение неразрывности и уравнение количества движения, и так же включается опция *Heat Transfer(Heat)*, для моделирования теплового процесса.

Далее переходим во вкладку *Model Options*. В поле *Polar (Axisymmetric about X - axis)* ставим *Axisymmetric*, обозначая таким образом то, что наша задача является осесимметричной. В поле *Transient Conditions* активизируется

опция *Transient*, для настройки нестационарности процесса. В появившемся окне настройки времени расчета задается число шагов *No. of Steps* - 5000, величина шага времени *Time Step*- 2E-05(экспоненциальная запись числа с порядком). В поле *Time Accuracy* выбирается полу неявная разностная схема *Crank-Nicolson* *Blending Factor* 0.7, которая используется для быстропротекающих процессов, в том числе и для расчета акустической волны. В результате меню *Model Options* должно выглядеть аналогично рисунку 6.22.

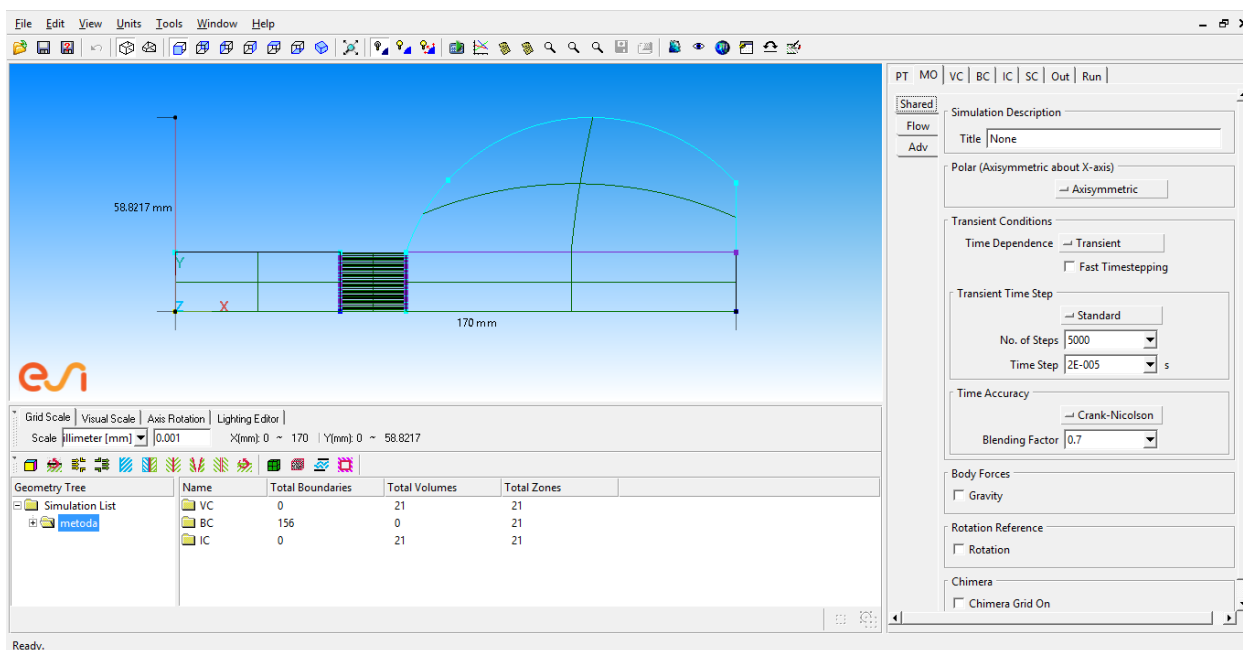


Рисунок 6.22 - Настройка расчетной модели

Во вкладке *Flow* меняем среднее давление в расчетной области *Reference Pressure* на 101325 Па.

Далее запускается меню настройки объемных условий *Volume Conditions*(VC). Затем зажимается клавиша *Shift*, и выделяется прямоугольником вся расчетная область. В поле *Material* в *Property Sources* выбирается *Import From Database* и в *Gas Material Name* выбирается *Air* (даже если он уже выбран, то все равно указывается еще раз, чтобы окно выглядело аналогично рисунку 6.23). Таким образом мы задано рабочее тело

(воздух), параметры которого меняются согласно уравнению состояния идеального газа.

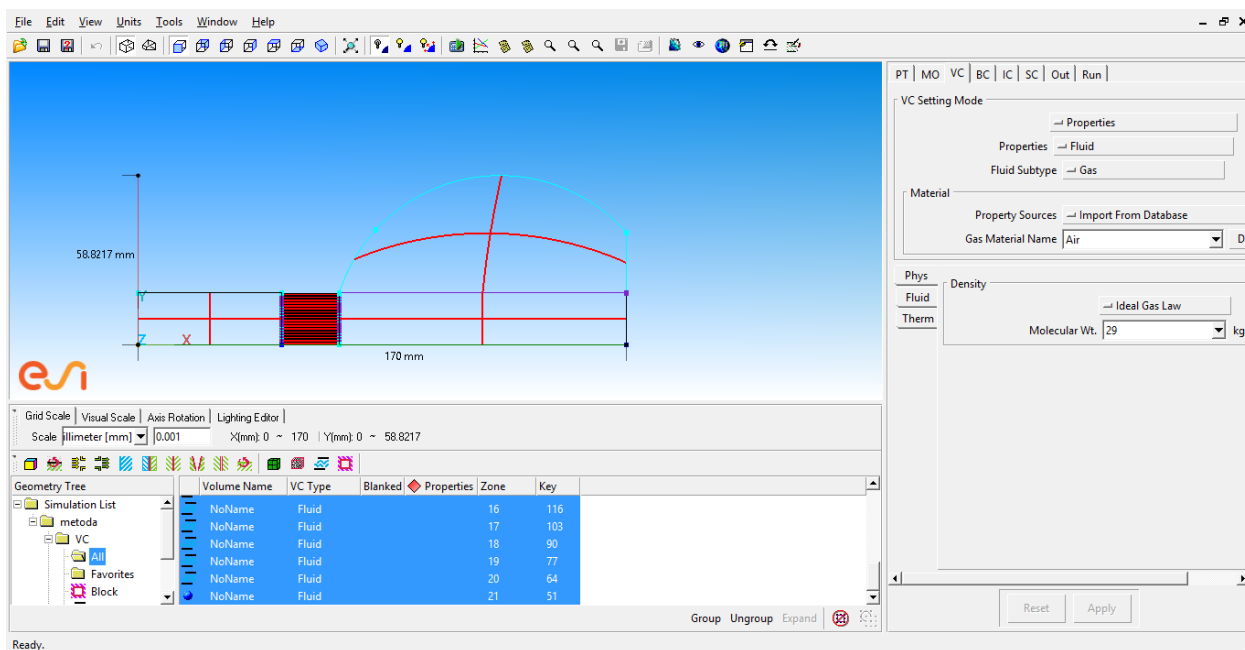


Рисунок 6.23 - Настройка расчетной модели

Далее выполняются настройки во вкладке *Boundary Conditions (BC)* и выбирается указанная ранее как *Inlet* граница. В поле *Sub Type* указываем *Fixed Pressure* и нажимаем *Apply*.

При нажатой клавише *Shift* выделяются все составляющие стэк прямые (параллельные оси *X*), а затем переходим во вкладку *Heat*, в поле *Sub Type* выбираем *Isothermal*, а в поле *Temperature* меняем на *Parametric*, как показано на рисунке 6.24. Теперь необходимо задать уравнение температурного градиента на стенках стэка, для чего выполняем следующие действия:

- нажимаем *Define...*;
- в появившемся окне в поле *Expression Table* жмем *Append*;
- в ячейке *Names* вводится название уравнения "GRADIENT";
- в ячейке *Values* вводится уравнение градиента $"500+200*\text{SIN}(50*\text{PI}*(X-0.02))"$

- нажимается *OK*, и в поле *Expression* выбирается заданное уравнение;
- нажимается *Apply*.

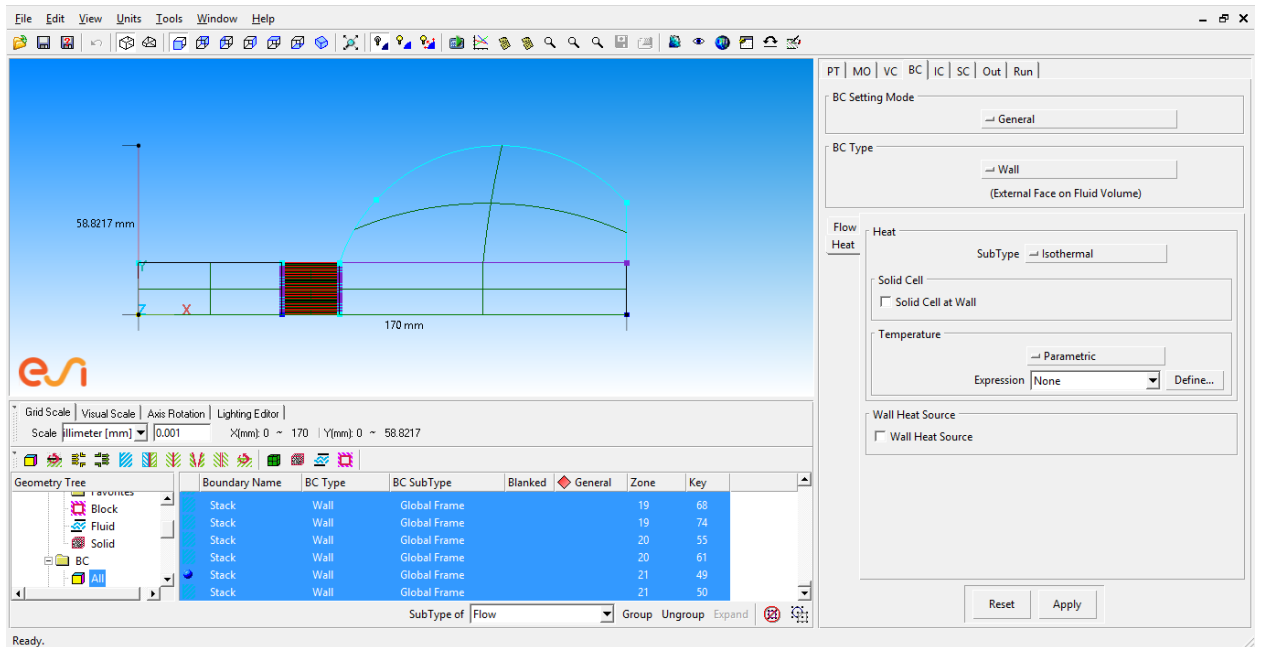


Рисунок 6.24 - Настройка расчетной модели

Переходим во вкладку *Solver Control (SC)* и задаем максимальное число итераций для каждого временного шага расчета *Max. Iterations 60*, как показано на рисунке 6.25.

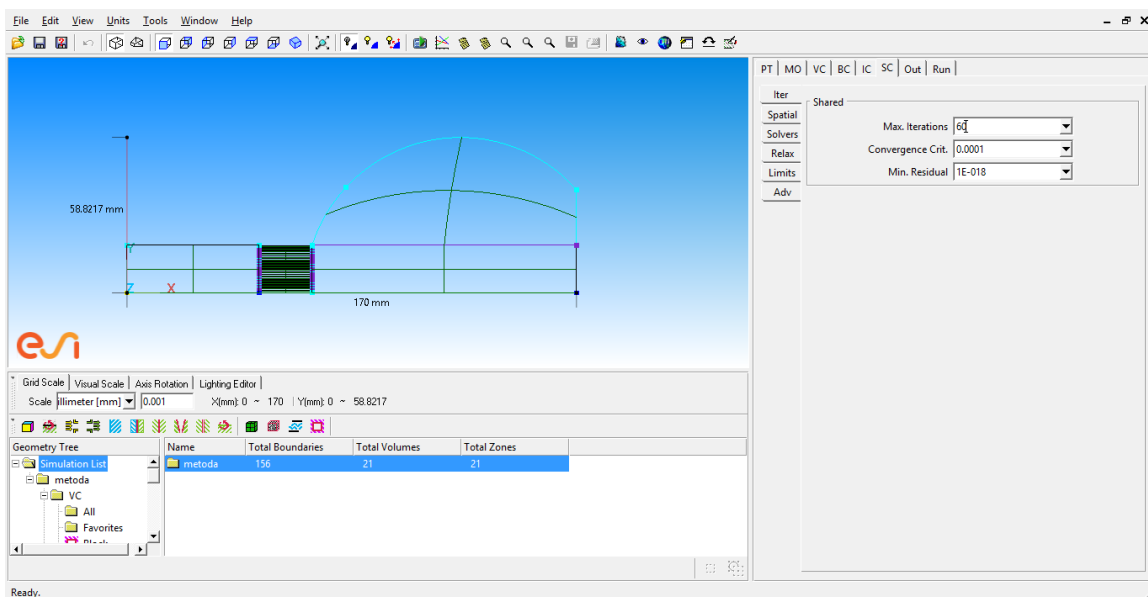


Рисунок 6.25 - Настройка расчетной модели

Во вкладке *Solver Control (SC)* переходим в *Relax* и выставляем все параметры релаксации на условия максимальной стабильности расчета, как показано на рисунке 6.26.

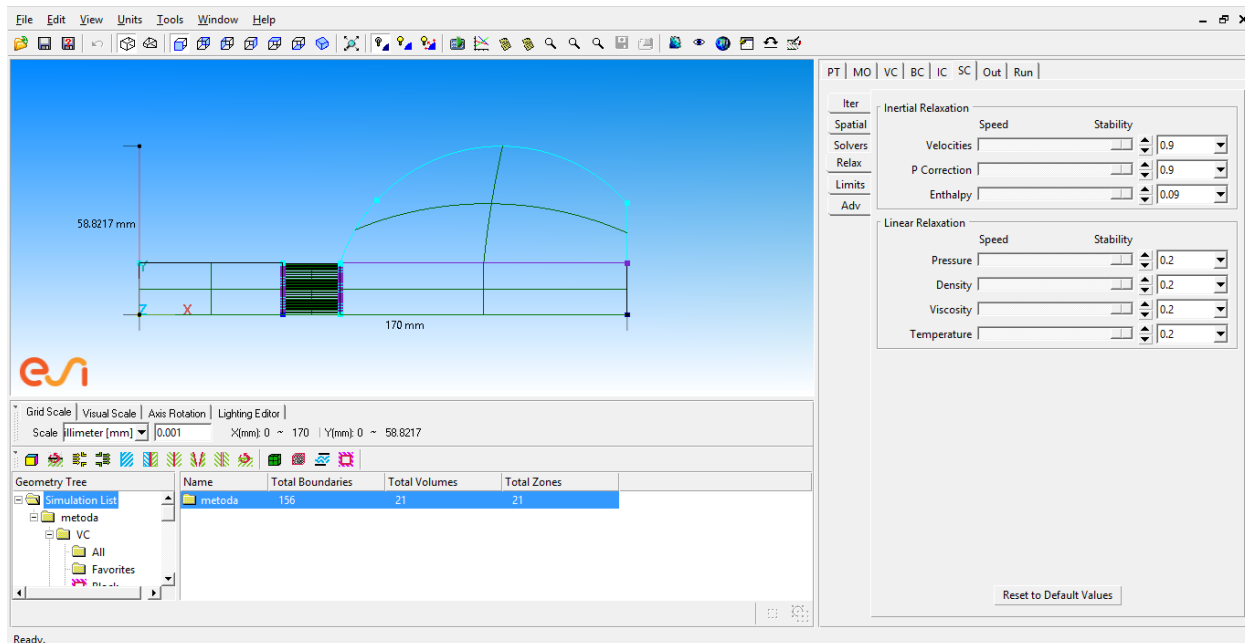


Рисунок 6.26 - Настройка расчетной модели

Переходим в меню *Output(Out)* для настройки выходных данных расчета. В "*General*" в поле *Every* ставим 10. Это значит, что программа будет записывать выходной файл с результатами через каждые 10 временных шагов. Во вкладке *Graphic* дополнительно ставится галочка напротив *Total Pressure*, для того чтобы получать на выходе также и значение необходимого нам полного давления (в соответствии с рисунком 6.27).

Затем осуществляется переход в меню *Run and Monitor(Run)*, где выбирается *Submit to Solver(начать расчет)*, после чего появляется окно в котором предлагается записывать расчетные файл в папку, в которой находится проект или создать отдельную папку. Выбираем создать отдельную папку *Submit Job Under a Different Name*. В папке проекта создаем новую папку под названием *Solution* и нажимаем ОК.

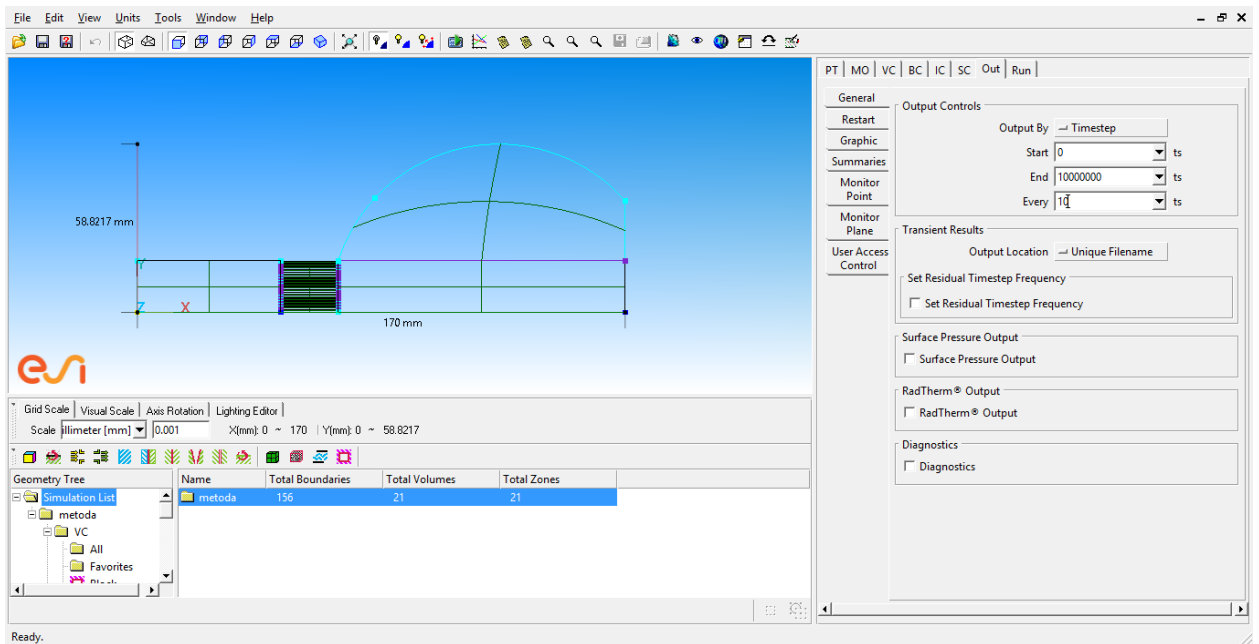


Рисунок 6.27 - Настройка расчетной модели

6.4 Обработка полученных результатов

Обработка полученных результатов осуществляется в программе CFD-VIEW. Ее запуск осуществляется нажатием на соответствующий ярлык на рабочем столе или из меню "Пуск", ОС "Windows":

Пуск → Все программы → ESI Group → CFD-VIEW

После чего появляется начальное окно программы изображенное на рисунке 6.28.

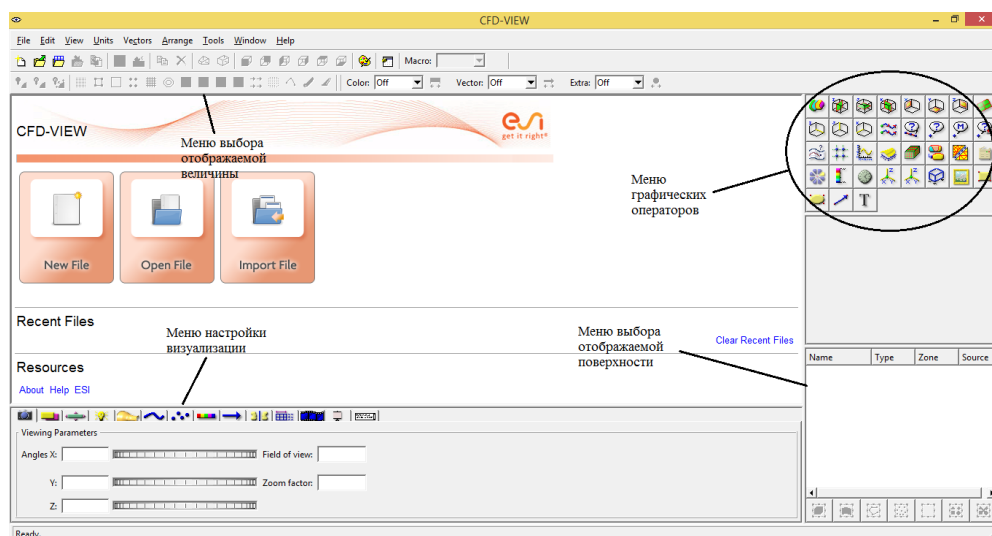


Рисунок 6.28 - Обработка полученных результатов

Нажимаем *Import File* и находим в папке проекта файл с названием "Название проекта"0000000.DTF, выбираем и нажимаем ОК. Далее заходим в *File* → *Select Files For Animation* и должен отобразиться путь к проекту. Затем выбираем в появившемся окне все файлы начиная с 0000000 до 0005000, с помощью клавиши *Shift* и последующего нажатия кнопки ОК.

В меню выбора отображаемой поверхности нажимаем *Select all surfaces*. После чего в меню выбора отображаемой величины активируем опцию *Colored surfaces on*, поверхность приобретет серый цвет. В поле *Color* можно выбрать любую интересующую нас величину (например зададим *P_tot*- Total Pressure). Дополнительно, в меню графических операторов активируется опция *Legend* (чтобы вывести на экран шкалу изменения давления).

Выведем на рабочее поле график изменения давления от времени в горле резонатора. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

- в меню графических операторов выбрать *Probe*, в результате чего на поверхности появиться красный крестик, который необходимо переместить в область горла резонатора;

- в меню графических операторов нажимаем *Point History*;

- ставим галочку напротив опции *Use Time Data from File* и выбираем *Plot* в меню графических редакторов;

- в поле *Plot Y-Axis* выбираем *P_tot* и ставим галочку на *Copy Plot Image into 3D Viewer*.

Появившееся окно графика можно увеличивать и уменьшать по размеру и перемещать по рабочей области независимо от отображенной поверхности. Располагаем модель и график как показано на рисунке 6.29. После чего повторно нажимаем *Select all surface*, переходим во вкладку *Color map* в меню настройки визуализации результатов расчета выбираем *Dynamic*,

чтобы область отображаемых значений автоматически перестраивалась в зависимости от шага.

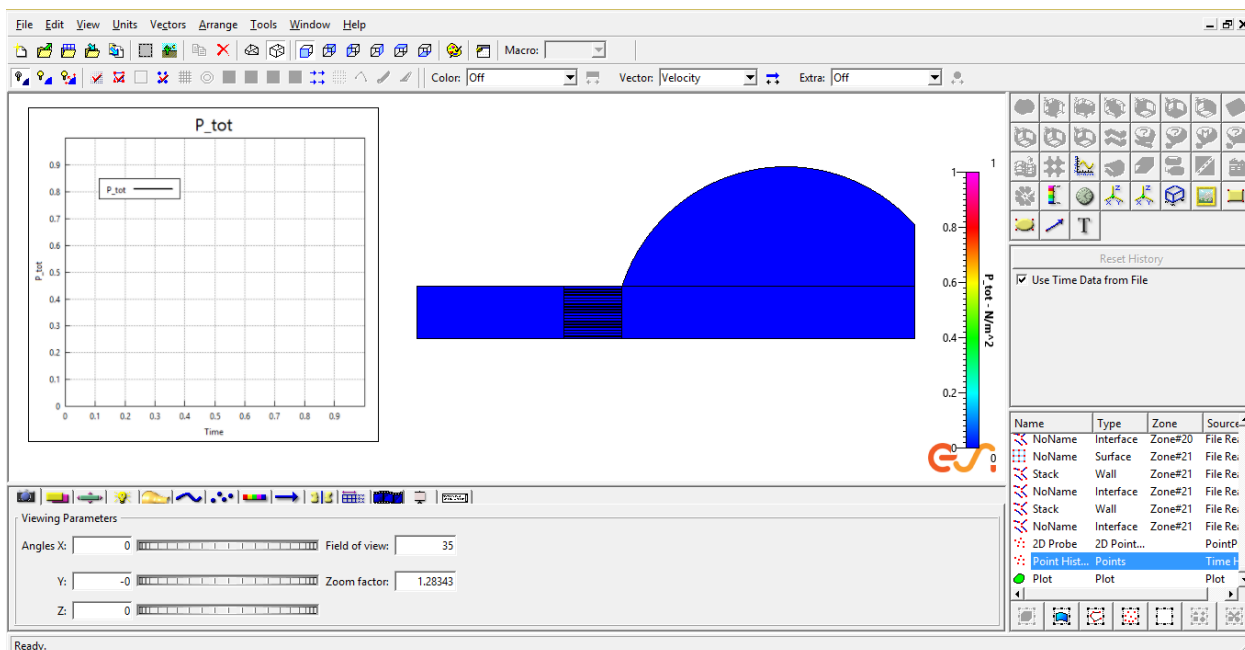


Рисунок 6.29 - Обработка полученных результатов

Для записи анимации необходимо перейти во вкладку *Animation* в меню настройки визуализации результатов расчета и нажать кнопку *Record* (красный круг). В появившемся окне нажимаем *Accept* и ждем окончания записи. При этом не желательно заслонять рабочую плоскость какими-либо окнами, так как в запись идут все действия происходящие на экране.

В папке с расчетом появится файл *animation.gif*, который можно открыть и просмотреть с помощью любого проигрывателя воспроизводящего *gif* анимации.

В меню выбора отображаемых поверхностей выбирается *Plot* (построенный график) и производится быстрое Фурье преобразование записанного сигнала (*FFT*) для определения рабочей частоты резонатора. Для этого в поле *Digital Signal Processor (DSP)* нажимаем "+" после чего *Create*. На графике будет представлен частотный спектр записанного сигнала, где наибольшему значению амплитуды сигнала соответствует рабочая частоты

резонатора, как показано на рисунке 6.30. Полученный график можно скрыть, отключив опцию *Copy Plot Image into 3D Viewer*.

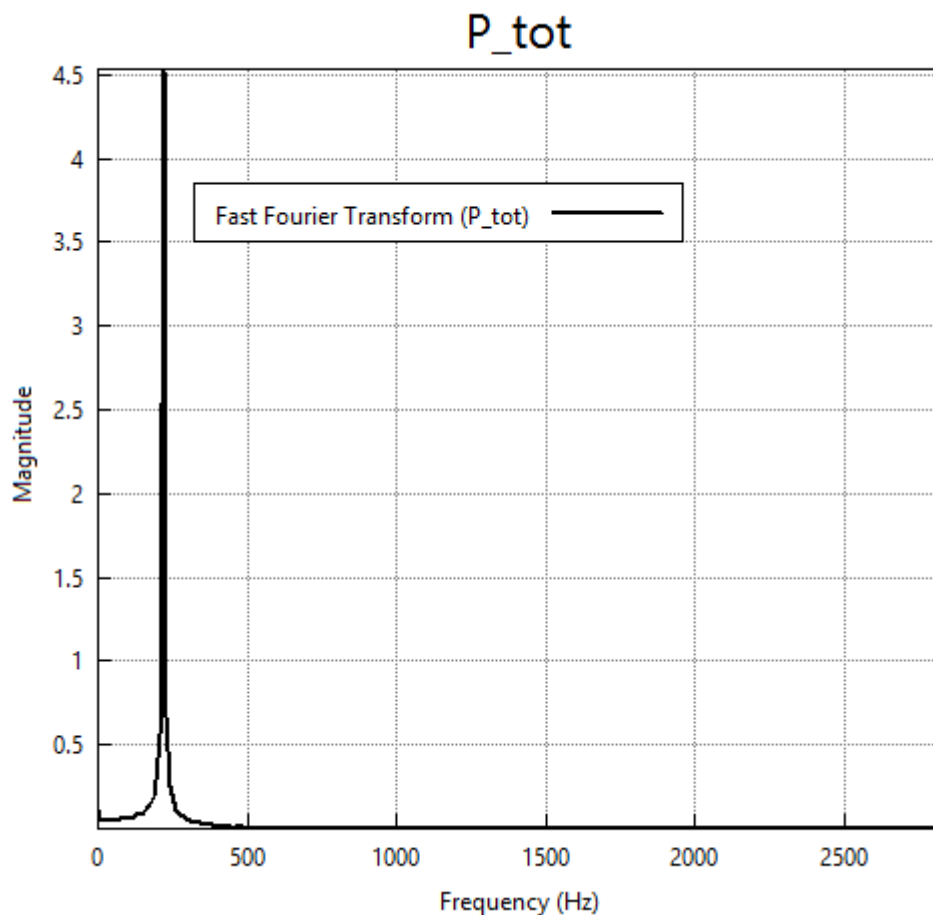


Рисунок 6.30 - Частотный спектр записанного сигнала

Далее выбирается верхняя или нижняя граница одного из каналов стэка и в меню графических операторов нажимается опция *Plot*. В появившемся окне настройки графика, по оси X откладывается координата X, а по оси Y выбирается T (температура), после чего данной графическое поле выводится на рабочую область экрана (для этого активируется опция *Copy Plot Image into 3D Viewer*). Полученный график демонстрирует форму заданного температурного градиента на стенках стэка (см. рисунок 6.31).

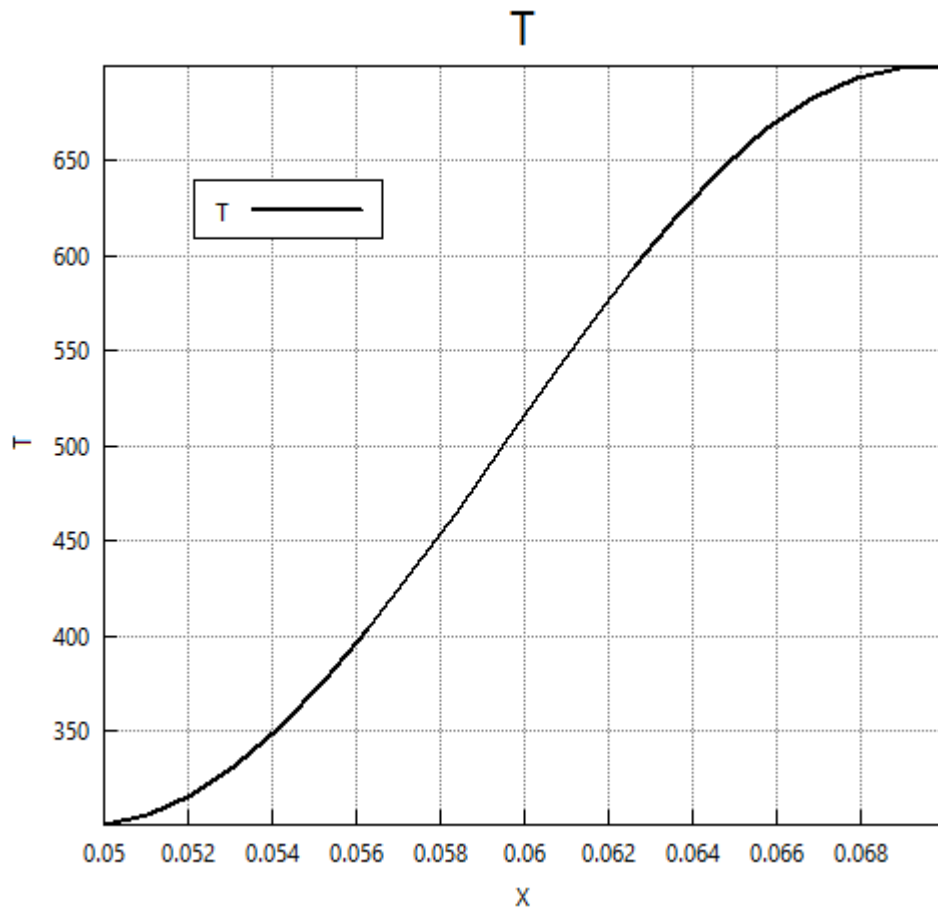


Рисунок 6.31 - Температурный градиент на стенках стэка

На следующем этапе данной работы проведем доказательство того что данный преобразователь является термоакустическим двигателем на стоячей волне. Для этого необходимо:

- в меню графических операторов выбрать *Probe*, в результате чего на поверхности появиться красный крестик, который необходимо переместить в область горла резонатора;
- в меню графических операторов активируется опция *Point History*;
- активируется *Use Time Data from File* и выбирается опция *Plot* в меню графических редакторов;
- по оси X откладывается *Time*, по оси Y откладываются P_{tot} и U (при зажатой клавише *LCtrl* выбираются по очереди P_{tot} и U);

- отключается опция *Multiple Curves Share Y-Axis Scale* (чтобы каждая величина имела свою размерную шкалу);
- активируется опция *Copy Plot Image into 3D Viewer*;
- во вкладке *Animation* в меню настройки визуализации, в поле *Current Frame* вводится количество кадров, равное 250;
- производится обнуление информации на выведенных графиках. Для этого в меню выбора отображаемой поверхности выбирается опция *Point History* и в появившемся окне нажимается *Reset History*, графики находящиеся на рабочей области экрана, должны обнулиться;
- во вкладке *Animation* нажимается *Play*.
- после того как на графике отрисуется один полный период рабочего процесса моделируемой установки, нажимается *Stop*;

В результате получается график, аналогичный изображенному на рисунке 6.32. Из графика видно, что разность фаз между изменением давления и скорости внутри установки составляет около 90 градусов, что соответствует термоакустическому преобразователю на стоячей волне.

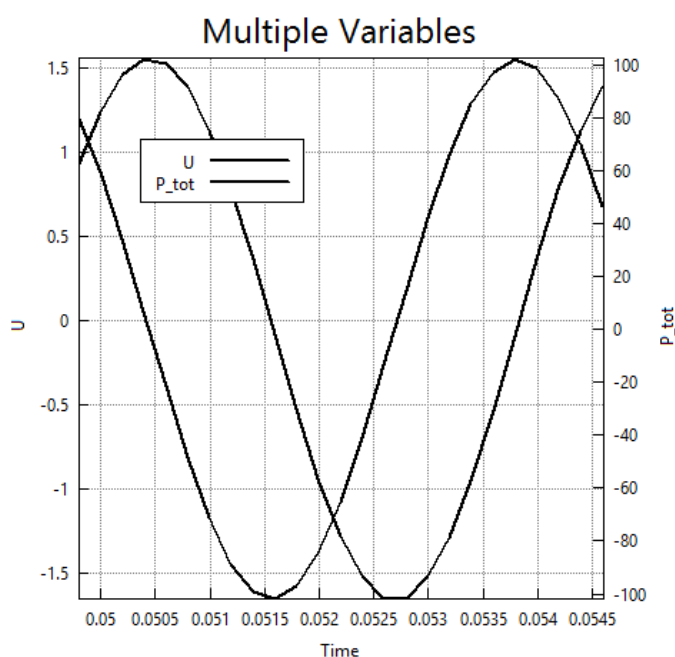


Рисунок 6.32 - Разность фаз между скоростью и давлением

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Стретт, Дж.В. Теория звука т.2 [Текст]/ Дж. В. Стретт. (Лорд Рэлей). - М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1958. - 475 с.
- 2 Swift, G. W. Thermoacoustic engines [Text]/ G.W. Swift// Journal of the Acoustical Society of America. - 1988.- Vol.84.- p. 1145–1180.
- 3 Yazaki, T. Measurement of sound generation in thermoacoustic oscillations [Text]/ T. Yazaki, A.Tominaga// Royal Society of London Proceedings Series A 454. - 1998.- p. 2113-2122.
- 4 Rott, N. Thermoacoustics [Text]/ N. Rott // Advances in Applied Mechanics.-Vol. 20.- 1980.- p. 135-175.
- 5 Зарембо, Л. К. Введение в нелинейную акустику [Текст]/ Л. К. Зарембо, В. А. Красильников. - М.: Наука, 1966. - 520 с.
- 6 CFD-ACEV2009.4: User Manual 2009.[Электронный ресурс]
<http://www.esi-cfd.com/>