

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Белинский Тимофей, студент 1^{го} курса ФЭФМ
Алябушев Павел, студент 1^{го} курса ФЭФМ

МФТИ

14.06.2023

Определение [1]

Термоакустический эффект – это преобразование тепловой энергии в звуковую или наоборот.

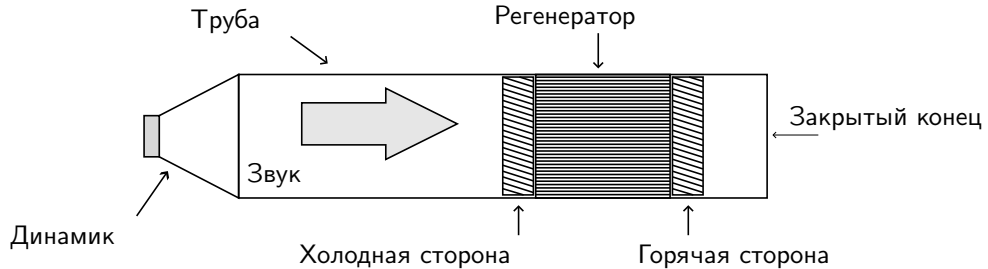


Рис. 1: Схематическое изображение термоакустического холодильника

Теоретическая часть I

- 1 Адиабатическое сжатие
- 2 Теплопередача при постоянном давлении
- 3 Адиабатическое расширение
- 4 Теплопередача при постоянном давлении

Глубина теплового проникновения [2]

$$\delta_k = \sqrt{\frac{\kappa}{c_V \rho \omega}}$$

κ — коэффициент теплопроводности газа, c_V — теплоемкость газа,

ρ — плотность газа, ω — частота колебаний

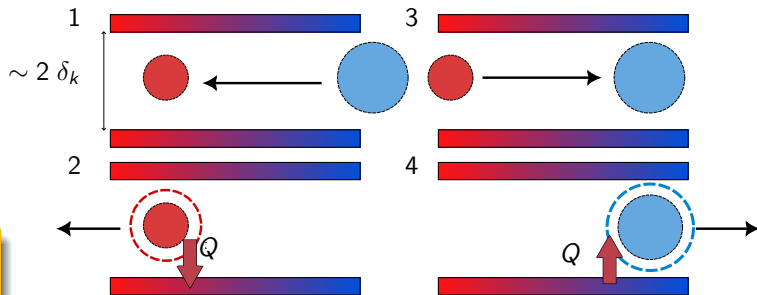


Рис. 2: Перенос тепла в регенераторе

Уравнения стоячей волны:

Давление

$$P(x, t) = P_1(x) \sin \omega t$$

$$P_1(x) = P_0 \cos kx$$

Скорость

$$u(x, t) = u_1 \cos \omega t$$

$$u_1(x) = \frac{p_0}{\rho_m a} \sin kx$$

Тепловой поток через
регенератор [2]

$$\dot{Q} \approx 2\Pi\delta_k P_1 u_1 (1 - \Gamma)$$

P_1 — амплитуда давления, u_1 — амплитуда скорости

$\Pi\delta_k u_1$ — эффективная объёмная скорость потока

Γ — отношение текущего градиента температур к максимально достижимому

Цели работы

- 1 Будет ли установка работать без регенератора?
- 2 Есть ли наилучшее положение регенератора (x), при котором достигается наибольшая разница температур?
- 3 Влияет ли положение регенаратора на то, какая сторона будет нагреваться, а какая охлаждаться?
- 4 Как влияет амплитуда колебаний на достигаемую разницу температур?

Экспериментальная установка I

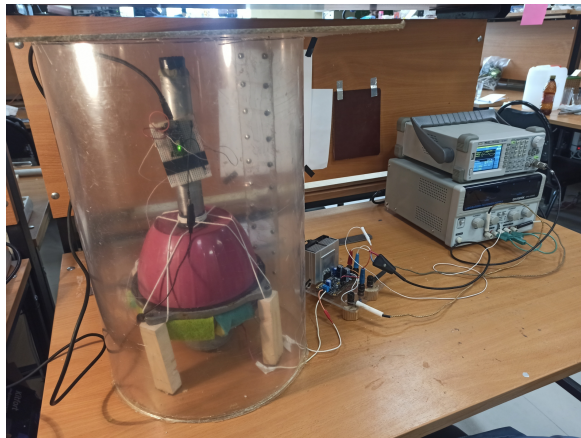
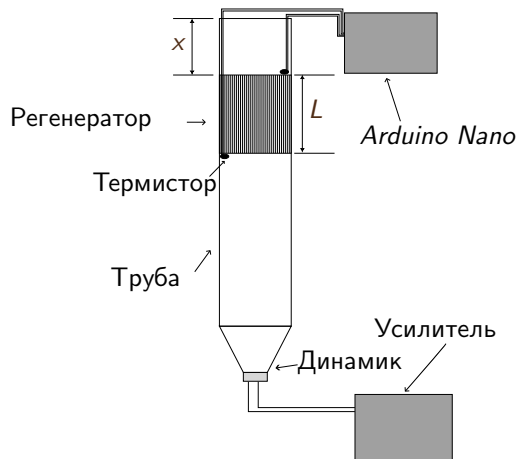


Рис. 3: Схематическая иллюстрация установки

Рис. 4: Фото установки

Экспериментальная установка II

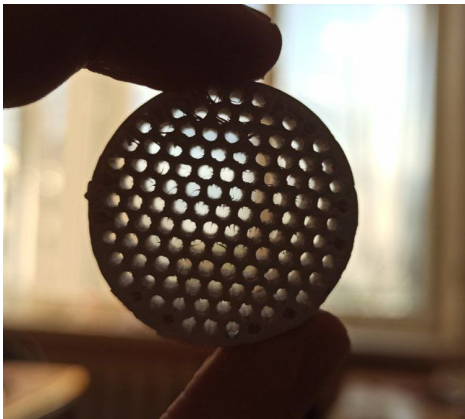


Рис. 5: Регенератор, напечатанный на 3D-принтере; диаметр отверстия 2 мм

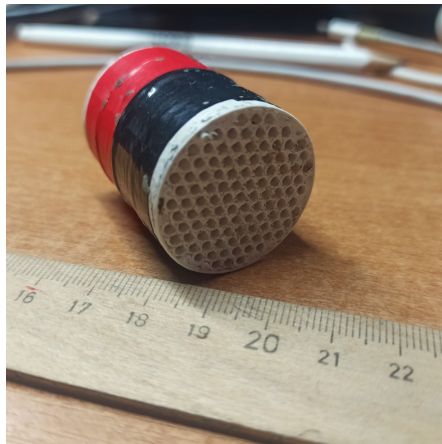


Рис. 6: Фото регенератора; длина 40 мм

Необходимость регенератора I

- ❶ Будет ли установка работать без регенератора?
 - Предполагаем, что термоакустического эффекта не будет, так как довольно важно влияние размера δ_k и в стоячей волне не переносится энергия.

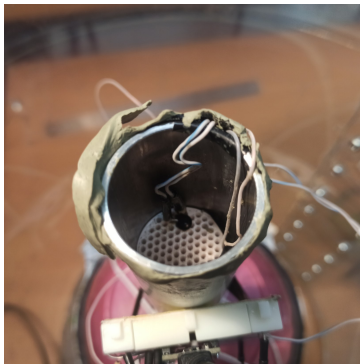


Рис. 7: Регенератор внутри трубы



Рис. 8: Термисторы без регенератора

Необходимость регенератора II

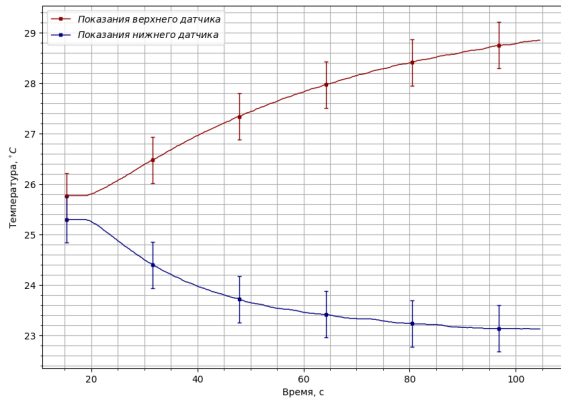


Рис. 9: Зависимость показаний термисторов от времени для установки с регенератором

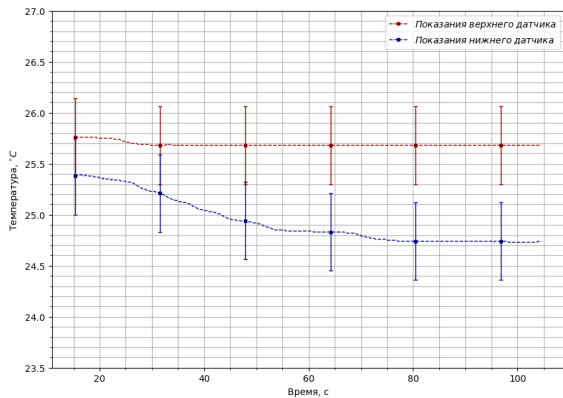


Рис. 10: Зависимость показаний термисторов от времени для установки без регенератора

Необходимость регенератора III

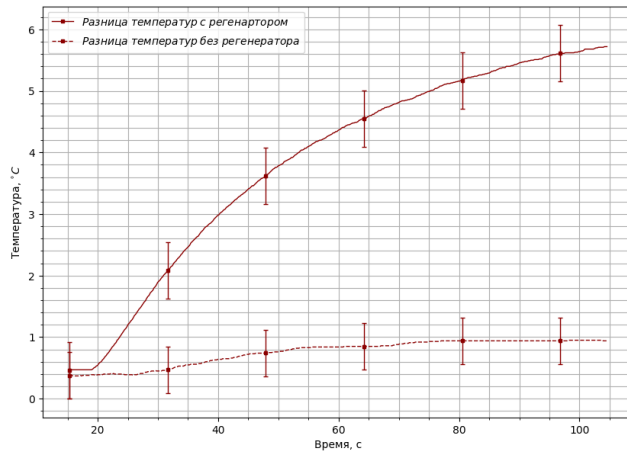


Рис. 11: Зависимость разницы показаний верхнего и нижнего датчиков от времени

Оптимизация по частоте колебаний

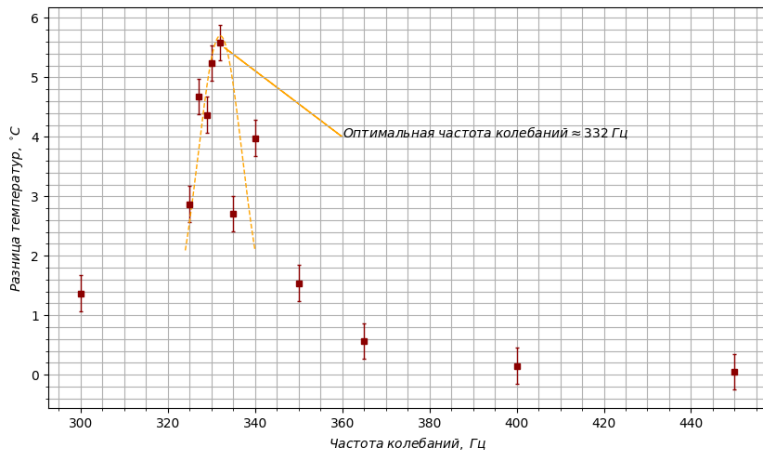


Рис. 12: Зависимость разницы температур, полученной на концах регенератора за 75 секунд работы установки, от частоты колебаний

Распределение давления в трубе I

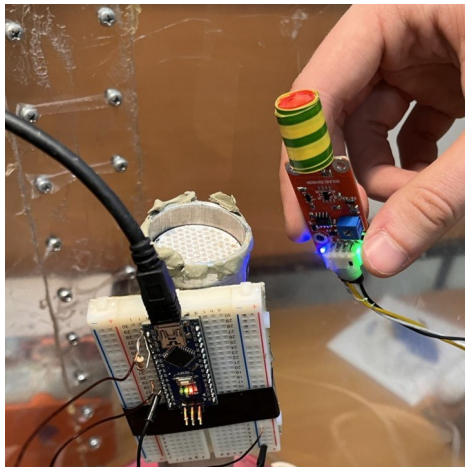


Рис. 13: Фото установки для проведения измерений

Распределение давления в трубе II

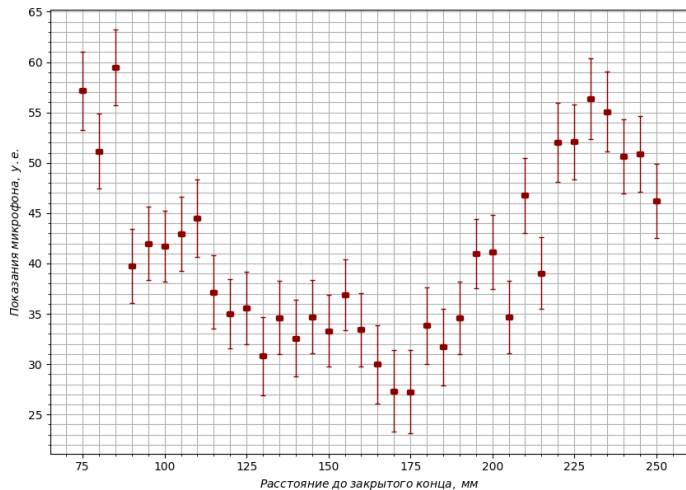


Рис. 14: Зависимость показаний микрофона от его положения в трубе

Наилучшее положение регенератора I

2. Есть ли наилучшее положение регенератора (x), при котором достигается большая разница температур?
 - Предполагаем, что такое положение есть и оно находится между соседними узлом и пучностью давления, так как тепловой поток зависит от давления и скорости
3. Влияет ли положение регенаратора на то, какая сторона будет нагреваться, а какая охлаждаться?
 - Предполагаем, что влияет: ближняя к узлу сторона будет охлаждаться, а ближняя к пучности - нагреваться, так как нагрев регенератора происходит в области сжатия газа

Тепловой поток через
регенератор [2]

$$\dot{Q} \approx 2\pi\delta_k P_1 u_1 (1 - \Gamma)$$

Наилучшее положение регенератора II

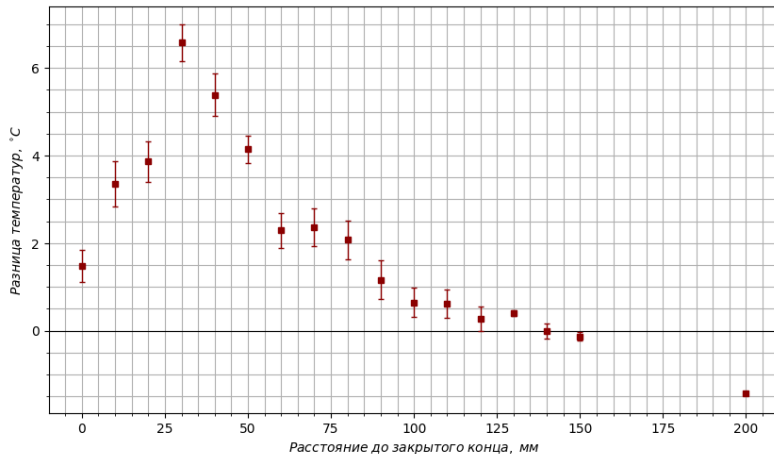


Рис. 15: Зависимость разницы температур на концах регенератора от его положения

Зависимость от амплитуды колебаний I

- ❶ Как влияет амплитуда колебаний на достигаемую разницу температур?
 - Предполагаем, что зависимость между амплитудой колебаний и разницей температур линейная, так как при адиабатическом сжатии изменение температуры линейно зависит от изменения давления

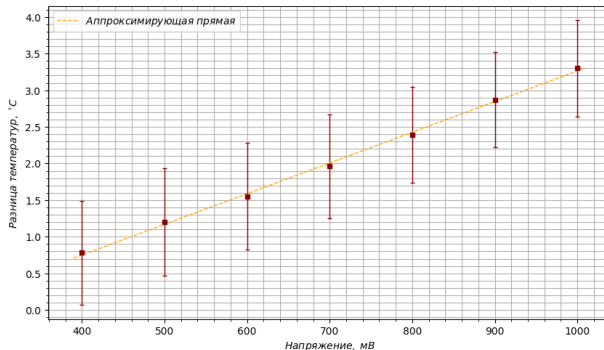


Рис. 16: Зависимость разницы температур на концах регенератора от напряжения, подаваемого на усилитель

Результаты

- ➊ Предположение о необходимости регенератора для работоспособности установки было подтверждено
- ➋ Найдено наилучшее положение регенератора. Как и ожидалось, оно расположилось между соседними пучностью и узлом давления
- ➌ Подтверждено, что нагревается сторона регенератора, находящаяся ближе к пучности, а охлаждается - ближняя к узлу
- ➍ Как и ожидалось, зависимость полученной на концах регенератора разницы температур от амплитуды колебаний линейная

Дальнейшее исследование

- Оптимизация работы установки по длине регенератора
- Оптимизация работы установки по величине отверстий в регенераторе
- Поиск новых гармоник для работы установки

- [1] Amirin. *Experimental study of thermoacoustic cooling with parallel-plate stack in different distances*. IOP Publishing Ltd, 2019.
- [2] M. E. H. Tijani. *Loudspeaker-driven thermo-acoustic refrigeration*. Technische Universiteit Eindhoven, 2001.