



# **МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ В БЫСТРОИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

**Лоцманов Матвей Владимирович**

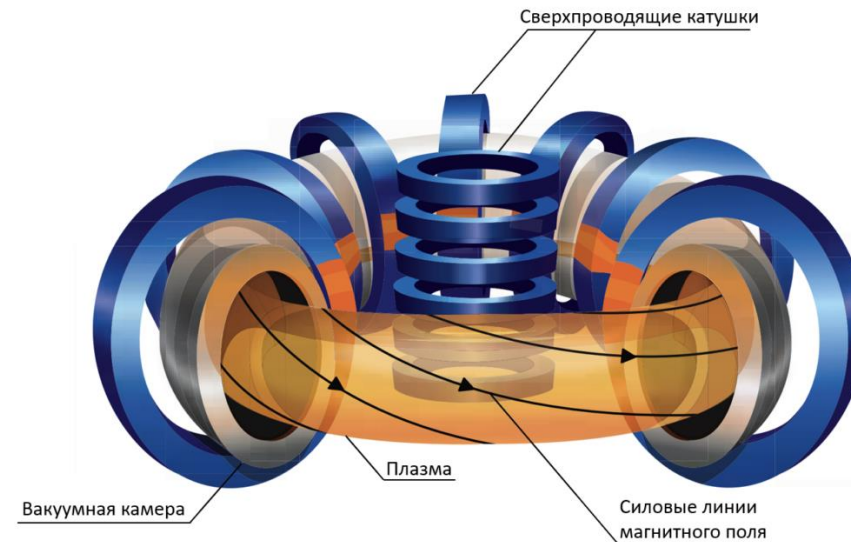
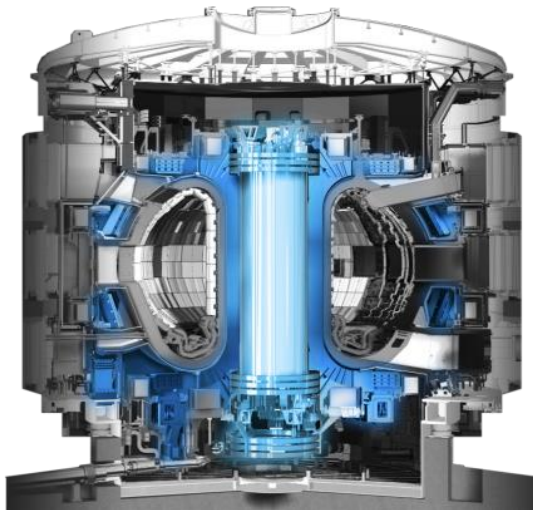
Рахимов Р.Ф.

Перцев И.П.

к.т.н. Беляев И.А.

# Введение

Исследование магнитогидродинамических течений жидких металлов актуально в контексте разработки систем охлаждения для термоядерных реакторов. Одной из ключевых проблем являются срывы плазмы, которые генерируют интенсивные нестационарные МГД-возмущения в электропроводящем теплоносителе [1], способные привести к значительным динамическим нагрузкам на конструкционные элементы [2].



1. ITER EDA N. J. W. S. et al. MHD stability, operational limits and disruptions. – 1999.
2. Поддубный И. И. и др. Опасные режимы теплообмена при течении жидкого металла в вертикальных трубах и каналах в условиях термоядерного реактора //ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. – 2015. – Т. 38. – №. 3. – С. 5-15.

# Перспективные датчики в заданных условиях задачи



*а*

*б*

*в*

*Рис.1. Датчики давления Kistler:*

*а - 701А, б – 601А, в – уменьшенная версия 601А*



*Рис.2. Оптоволоконный датчик давления с мембраной и без нее*



*Рис.3. Фотозлектронный умножитель и источник лазера*



*1*

*2*

*Рис. 4. Мембраны для оптоволоконного датчика:*

*1 – нержавеющая сталь, 2 – тантал*

# Метод и процесс получения калибровочной зависимости

Калибровка датчиков проводилась на калибраторе давления ЭЛЕМЕР-АКД-12КИ (рис.8).

Для исследования влияния магнитного поля на датчики использовался электромагнит на базе РК-3 (рис.9) [1].



Рис.5. ЭЛЕМЕР-АКД-12КИ

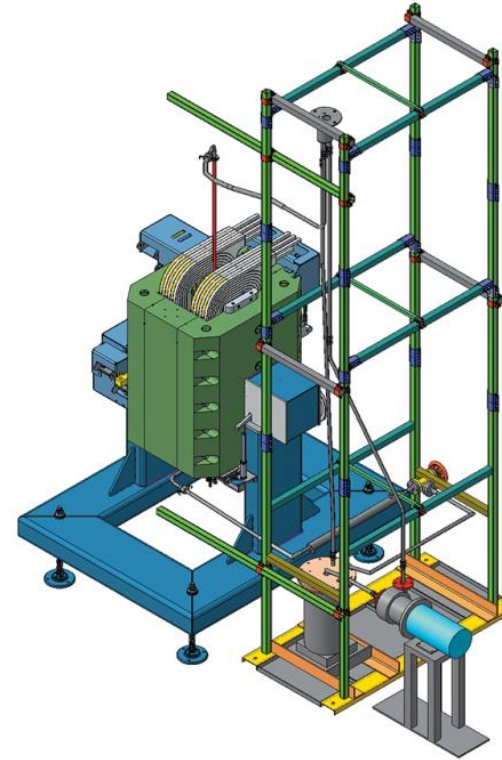


Рис.6. Схема установки РК-3



Рис.7. Расположение датчика в магните

1. Беляев И. А. и др. Экспериментальный стенд для исследований теплообмена перспективных теплоносителей ядерной энергетики. Теплоэнергетика, (11), 66-74 (2017).

# Результаты по калибровке

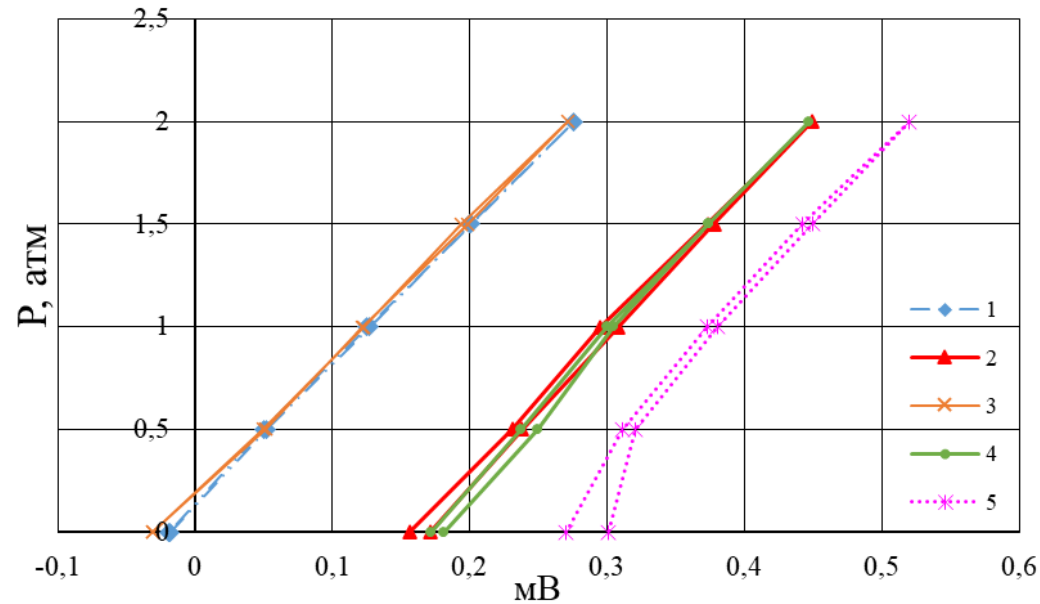


Рис. 8. Калибровка Kistler 601A:

1 – без магнитного поля, 2 – в МП ( $B = 1$  Тл),  
3 – сразу после отключения магнитного поля,  
4 – повторно в МП ( $B = 1$  Тл),  
5 – в магнитном поле ( $B = 1,7$  Тл).

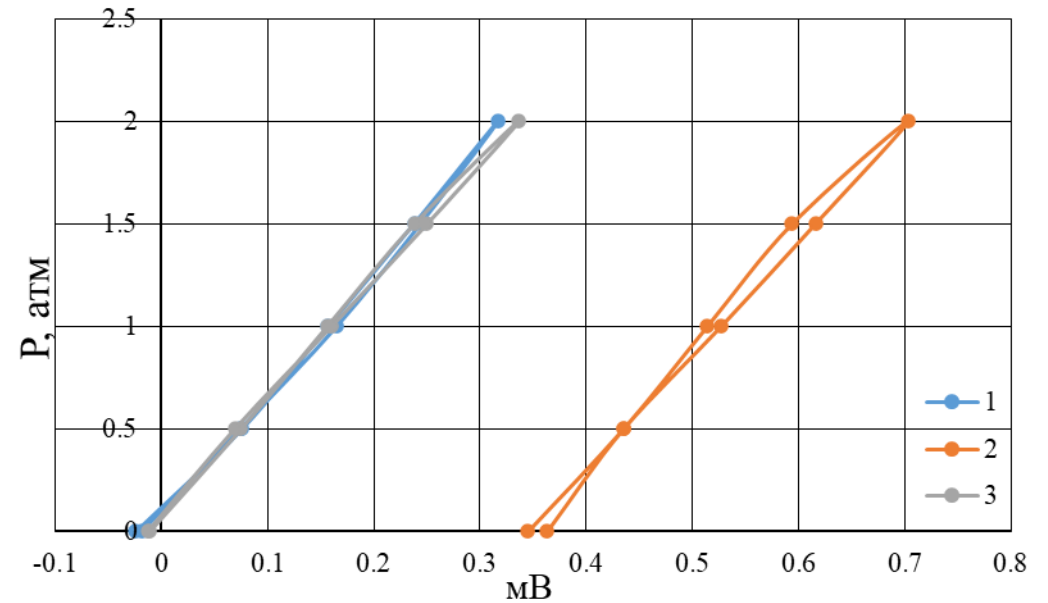


Рис. 9. Калибровка уменьшенной версии Kistler 601A:

1 – без магнитного поля,  
2 – в магнитном поле ( $B = 1.7$  Тл),  
3 – сразу после отключения магнитного поля

# Оптоволоконный датчик давления: выбор материала мембран

Требования к датчикам по [1]:

1. Чувствительная часть датчика должна иметь минимальные размеры, следовательно, материал мембраны должен быть таким, чтобы можно было изготовить ее минимальной толщиной с сохранением стабильных упругих свойств.
2. Резонансная частота мембраны – наивысшая, для достижения высокого временного разрешения и точного измерения быстроменяющихся процессов.
3. Система регистрации мембраны должна быть высокочувствительной, чтобы улавливать чрезвычайно малые сигналы

| Материал | $\mu$ | Е, ГПа | $\rho$ , г/см <sup>3</sup> | h, мкм | $f_{рез}$ |
|----------|-------|--------|----------------------------|--------|-----------|
| AISI 304 | 0.3   | 200    | 7.85                       | 20     | 168.69    |
| Тантал   | 0.35  | 186    | 16.65                      | 20     | 140.83    |
| Стекло   | 0.3   | 83     | 2.2                        | 20     | 138.62    |
| Алюминий | 0.34  | 69     | 2.7                        | 20     | 93.47     |
| Керамика | 0.26  | 400    | 3.9                        | 20     | 274.77    |
| Свинец   | 0.44  | 18     | 11.34                      | 20     | 36.75     |

Табл. 1. Свойства материалов

- |                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Жилин В. Г. и др. Оптико-механические преобразователи давления //Теплофизика высоких температур. – 1979. – Т. 17. – №. 5. – С. 1064-1068. |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|



# Оптоволоконный датчик давления: выбор материала мембран

Прогиб  $y$  в центре мембраны [1]

$$y = \frac{3}{16} p \frac{1 - \mu^2}{E h^3},$$

Частота собственных колебаний  $f_{\text{рез}}$  [1]

$$f_{\text{рез}} = \frac{10,21h}{r^2} \left( \frac{E}{12(1 - \mu^2)\rho} \right)^{1/2}$$

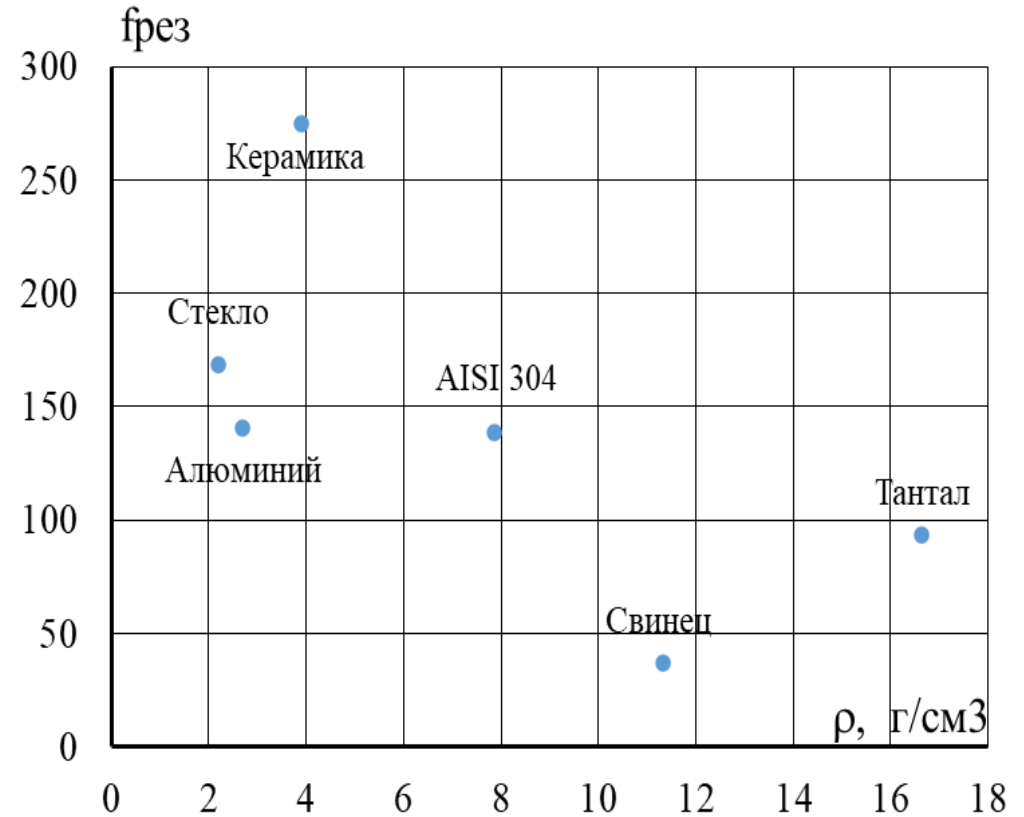


Рис. 10. Выбор материала мембраны.

1. А. Н. Филиппов. Колебания деформируемых систем. «Машиностроение», 1970.

# Вывод

- На построенных кривых для датчиков давления Kistler 601A и ее уменьшенной версии наблюдается смещение, обусловленное воздействием магнитного поля на датчик. Заметна относительная стабильность калибровочных кривых с сохранением линейности и угла наклона.
- Учитывая требования к мембранным датчикам [1] следует выбрать не керамику или стекло, основываясь на высокой  $f_{рез}$ , в качестве материала для мембраны, а тантал или нержавеющей сталь, т.к. они имеют хорошие упругие свойства.
- Наиболее перспективная технология по измерению пульсаций давления является оптоволоконный датчик. На данный момент введутся работы по воссозданию технологии.

1. Жилин В. Г. и др. Оптико-механические преобразователи давления //Теплофизика высоких температур. – 1979. – Т. 17. – №. 5. – С. 1064-1068.





**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №25-19-00642 "МГД течения при быстро меняющихся сильных магнитных полях и электрических пробоях в жидкость" от 29.05.2025*