



# **Криогенные и сверхпроводящие электроэнергетические устройства (000025237)**

Лекция 10

**Профессор Е.Ю.Клименко**



# **Динамическая стабильность СП проволок**

# Скоростная зависимость максимального тока СП проволоки

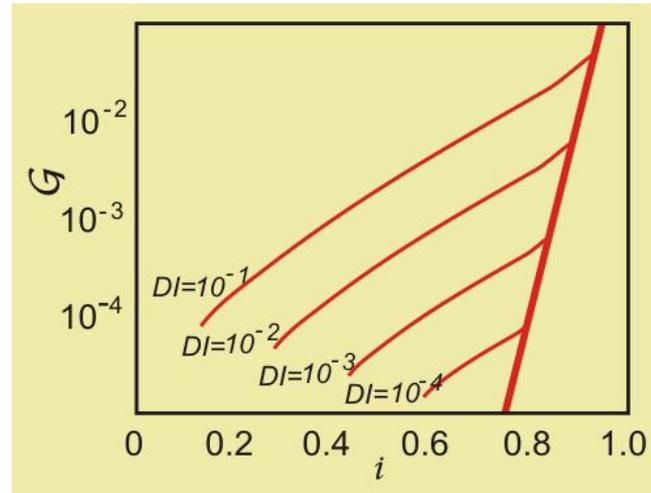
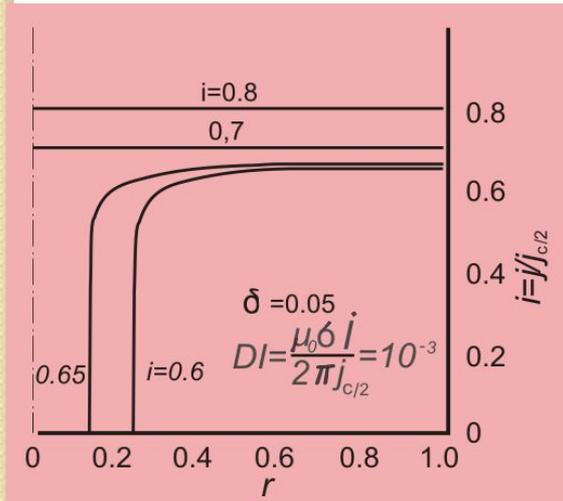
В лекции 8 упомянут критерий стабильности для случая  $\tau_m \gg \tau_h \gg \tau_\lambda$

$$j \int_S EdS = hP\delta \cdot T_c$$

Устойчивость нарушается при перегреве  $T - T_b = \delta \cdot T_c$

Критерий более либеральный по сравнению с  $IE = hP\delta \cdot T_c$ . Он более либерален, поскольку позволяет рассматривать случай неоднородного распределения электрического поля (а следовательно и тока) по сечению сверхпроводника. Применим этот критерий к случаю линейно возрастающего поля со скоростью:

$$DI = \frac{\sigma\mu_0 \dot{i}}{2\pi j_{c/2}}$$



Это результаты численного расчета.

Безразмерный ток

$$i = \frac{I}{\pi r^2 j_{c/2}}$$

Безразмерная мощность генерации

тепла

$$G = \frac{\int_S EdS}{hP\delta \cdot T_c}$$

# Скоростная зависимость максимального тока СП проволоки

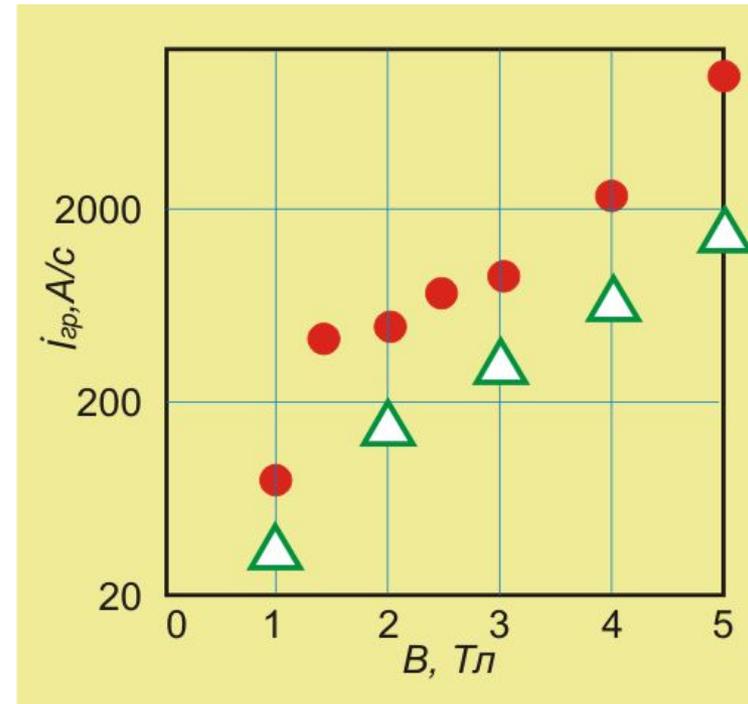
Максимальная скорость нарастания тока, при которой нарушается устойчивость:

$$\dot{i}_{гр} = \frac{2\pi R \delta T_c}{\mu_0 I_c / 2} = \frac{2\pi E_q}{\mu_0}$$

## Эксперимент по определению максимальной скорости.

Материал: Ниобий-циркониевая проволока диаметром 0.33 мм длиной 40 мм. Диаметр сверхпроводника 0.26 мм. В одном эксперименте регистрировали стационарные ВАХ в различных магнитных полях и определяли  $E_q$ . Затем вводили ток с различными скоростями и определяли, при какой скорости ток срыва начинал убывать.

На рисунке сопоставлены результаты измерения граничной скорости с расчетом этой скорости по электрическому полю срыва с помощью приведенного выше выражения. Видно, что стабильность заметно выше предсказанной. **В динамических экспериментах необходимо учитывать роль теплоемкости.**



# СП проволока в изменяющемся

## поле

Критерии стабильности проволоки с учетом ее теплоемкости зависят от соотношения характерных времен

При хорошей теплопроводности:

$$j^2 d^2 \leq \left( \frac{3C}{\mu_0} + \frac{2.08 h \delta j_c}{\dot{B}} \right) (T_c - T_b) \text{ при } \tau_\lambda \ll \tau_m \text{ и } \tau_\lambda \ll \tau_h$$

Если скачок происходит при неполном проникании поля в пластину:

$$\Delta B^2 \leq \left( 3\mu_0 C \frac{\Delta B_p}{\Delta B} + 2.08 \mu_0^2 \frac{h \delta j_c}{\dot{B}} \right) (T_c - T_b) \quad \text{при тех же}$$

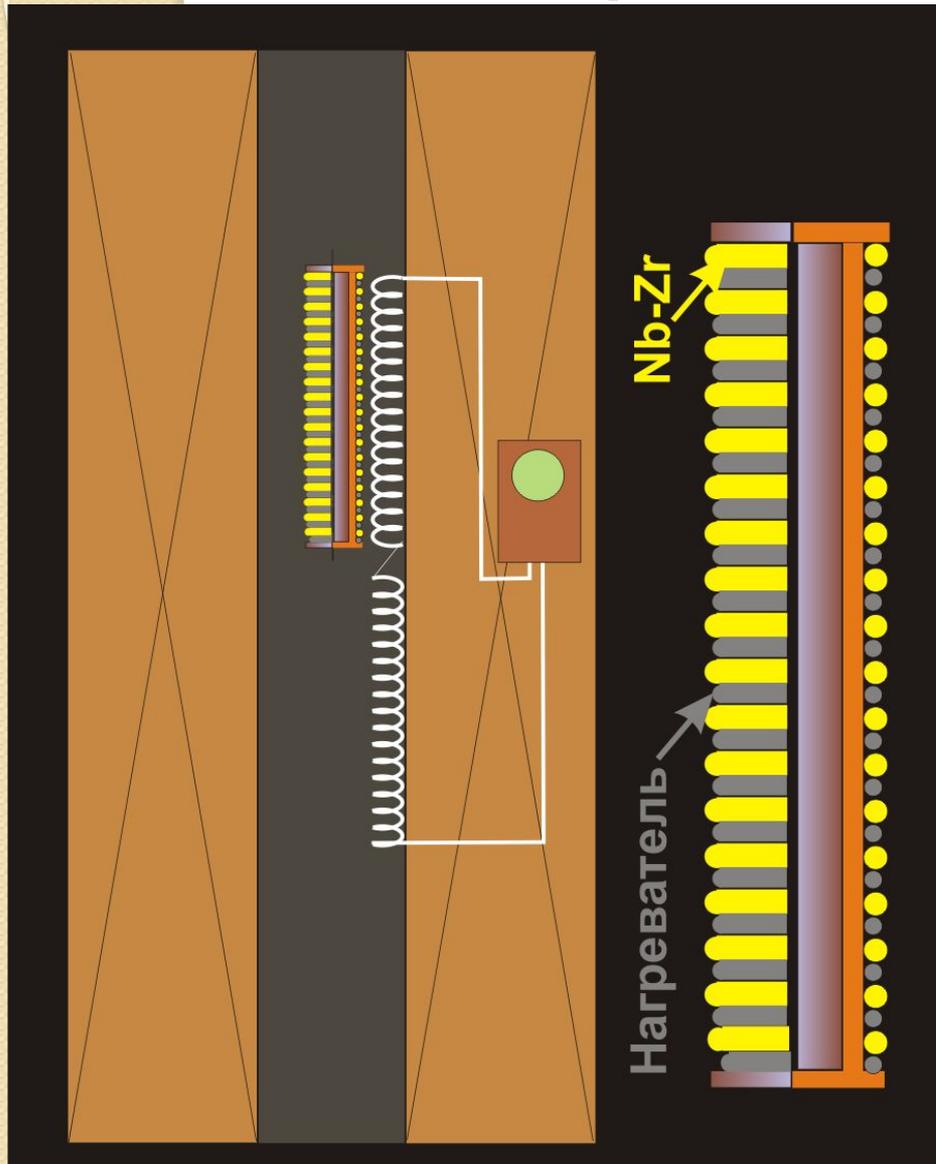
Здесь  $\Delta B_p$  - перепад поля, при котором происходит скачок,

- перепад поля при полном проникании (до середины пластины).

Существует граничная скорость, выше которой скачки не происходят:

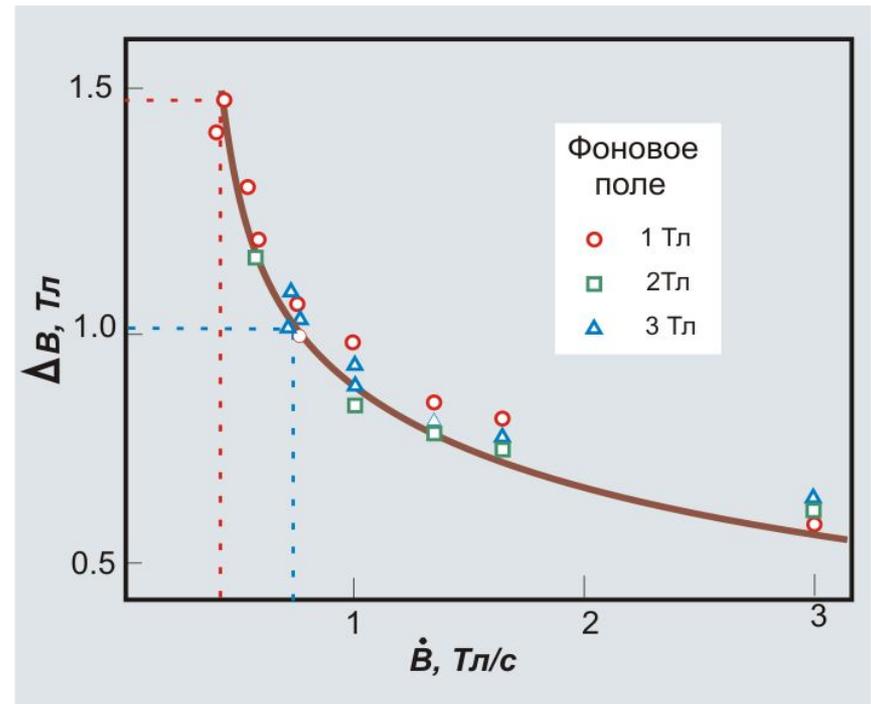
$$\dot{B} < \dot{B}_{гр} = \frac{2.08 \mu_0^2 h \delta j_c (T_c - T_b)}{\Delta B_p^2 - 3\mu_0 C (T_c - T_b)}$$

# Экспериментальная проверка теории



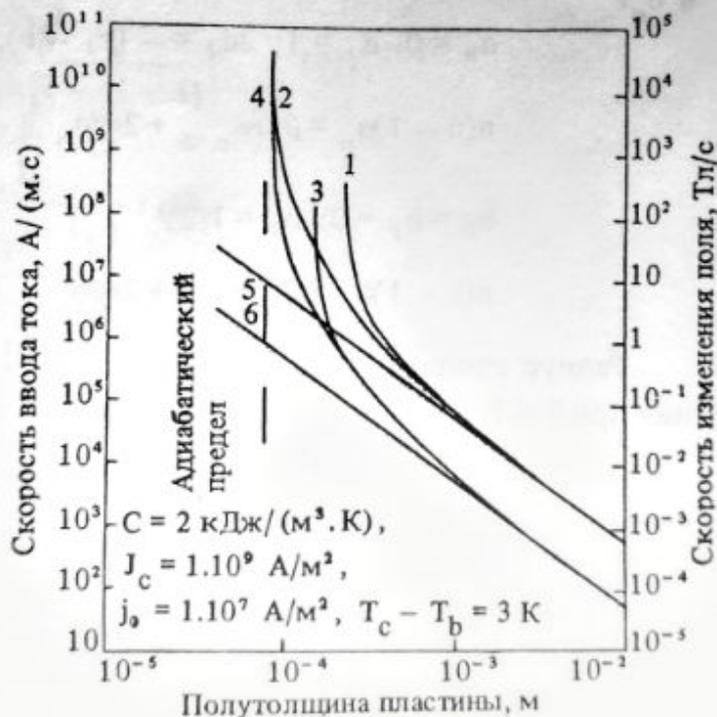
$$C = 2.0 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \text{К}} \quad h = 3.5 \cdot 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}$$

Теплоотдачу непосредственно определить трудно. Ее подобрали в одной точке при минимальной скорости изменения магнитного поля



# Стабильность СП проволок на высоких

Рис. 6. Зависимость полутолщины устойчивой сверхпроводящей пластины от скорости изменения магнитного поля или скорости ввода тока. Обозначения кривых даны в тексте



Детальная теория, учитывающая теплоемкость предсказывает стабильность тонких проводов при электрических полях, существенно превышающих критерий  $j \int_S E dS = hP\delta \cdot T_c$ , полученный в допущении, что скачок потока развивается при неизменном (замороженном) распределении тока. При повышенных полях дифференциальное сопротивление сверхпроводника экспоненциально растет, и медная матрица начинает играть роль в обеспечении стабильности проводов.

Снижение токонесущей способности при разогреве проволоки за счет потерь при недостаточном теплоотводе играет двойную роль: достигаемый ток может снизиться, но скачок, который мог перевести провод в нормальное состояние при температуре ванны, может не произойти. Это может привести к некоторому увеличению достигнутого тока.

1 и 3 – учет и теплоемкости и проводимости матрицы,  
 2 и 4- учет только теплоемкости,  
 5 и 6 – модель замороженного поля  
 1,2,5.-  $h=1000$  Вт/(м<sup>2</sup> К), 3,4,6 –  $h= 100$  Вт/(м<sup>2</sup> К)

# Эксперимент на частотах до 2500 Гц

## Описание образца:

Проволока фирмы «Alstom-Atlantique»

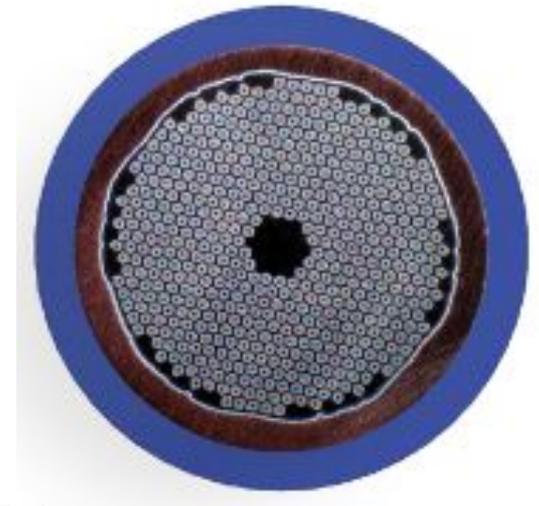
диаметр 0.3 мм

диаметр волокна 1.25 мкм

сверхпроводник Nb-Ti (кз 25%)

матрица Cu -47% , Cu-Ni -28%

Постоянная затухания кооперативных токов 5.4 мс



## Соленоид:

Число слоев 3

Внутренний диаметр 8.5 мм

Наружный диаметр 13 мм

Длина 60 мм

Каналы охлаждения между слоями 0.6 мм

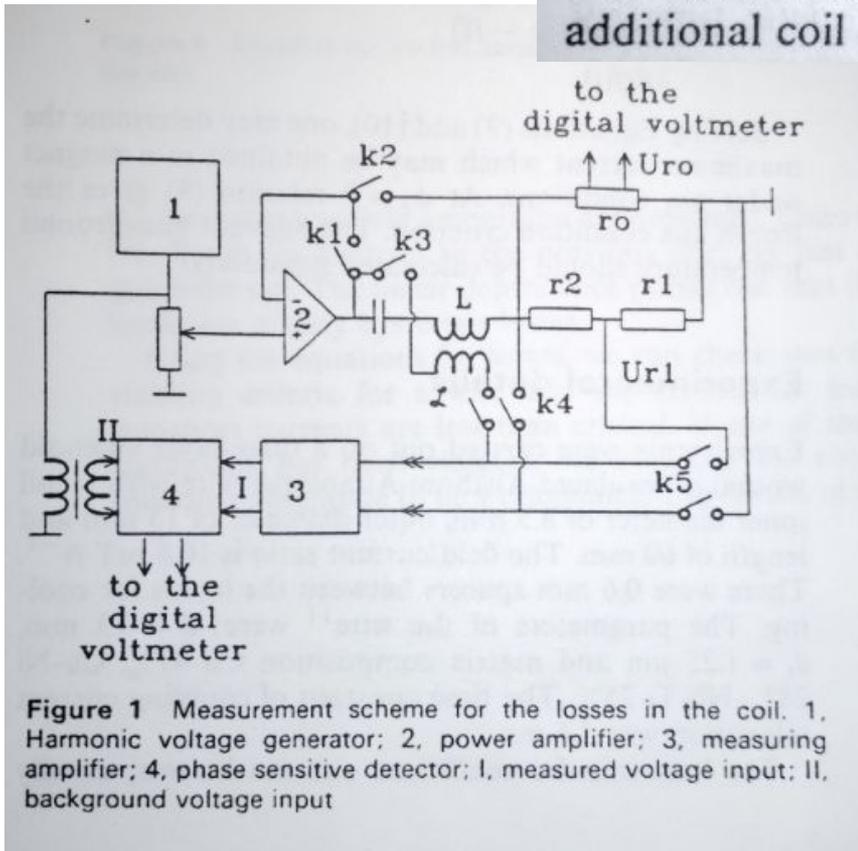
Отношение поле/ток 10.6 мТл/А

Длина проволоки в образце 6.75 м

# Схема

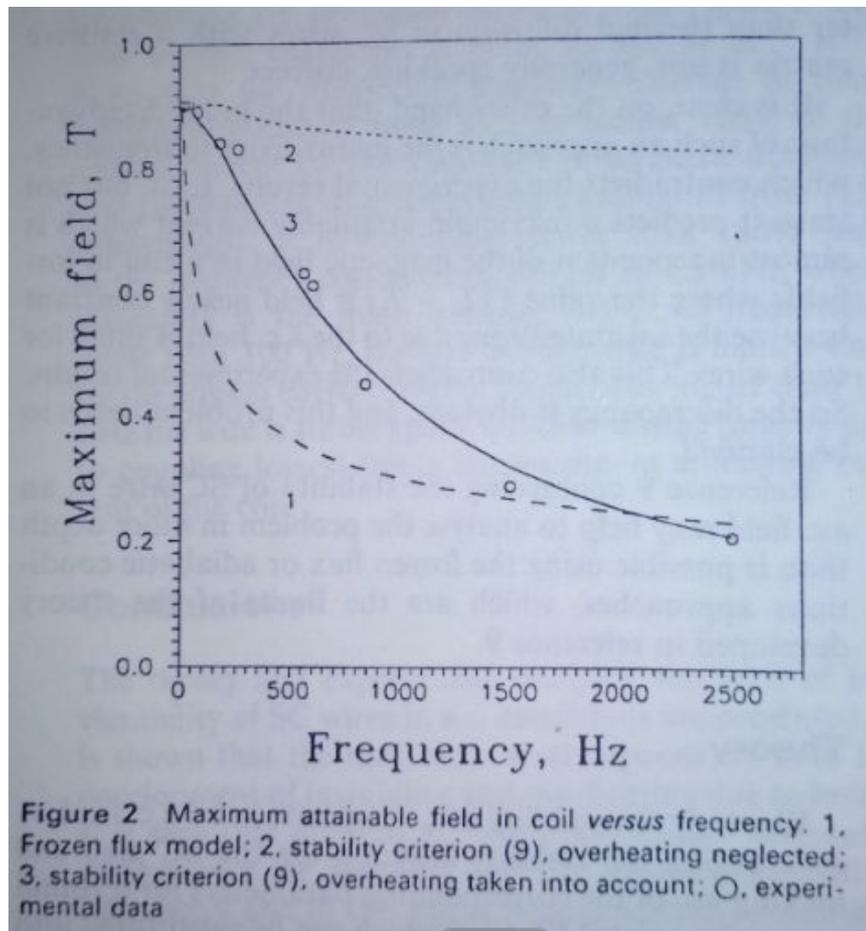
ИЗМ

A schematic of the experimental measurement arrangement is shown in *Figure 1*. This layout allowed measuring of losses over the full range of frequencies used in the experiment, up to 2.5 kHz. Switches 2 and 3 are closed with switch 1 open at frequencies lower than 120 Hz. At higher frequencies, switches 2 and 3 are open and switch 1 is closed. To compensate the inductive voltage an additional coil is used.



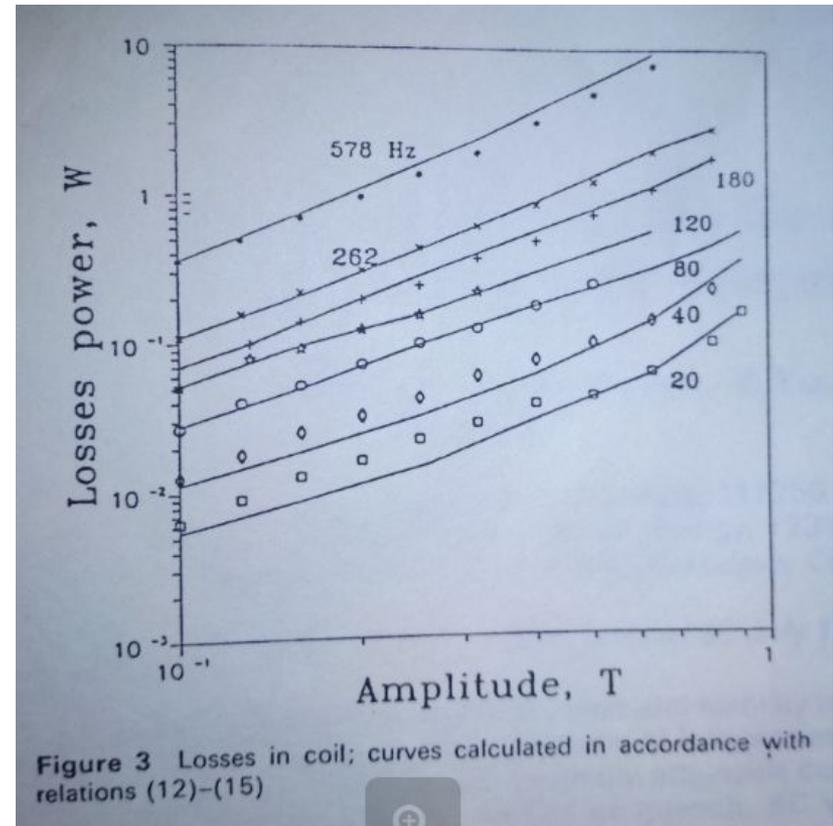
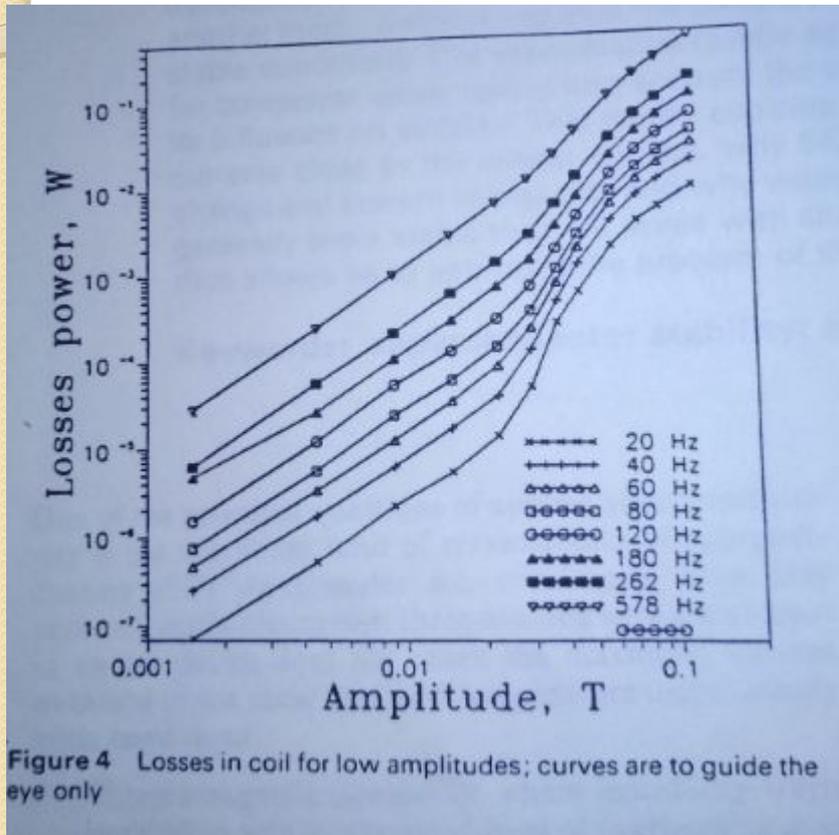
# Стабильность образца

Максимальный ток в образце ограничен разогревом обмотки.



- 1- предсказания модели замороженного поля,
- 2- стабильность с учетом теплоемкости и проводимости матрицы,
- 3- стабильность с учетом разогрева провода потерями.

# Генерация тепла в образце





**Спасибо за внимание**