



Криогенные и сверхпроводящие электроэнергетические устройства (000025237)

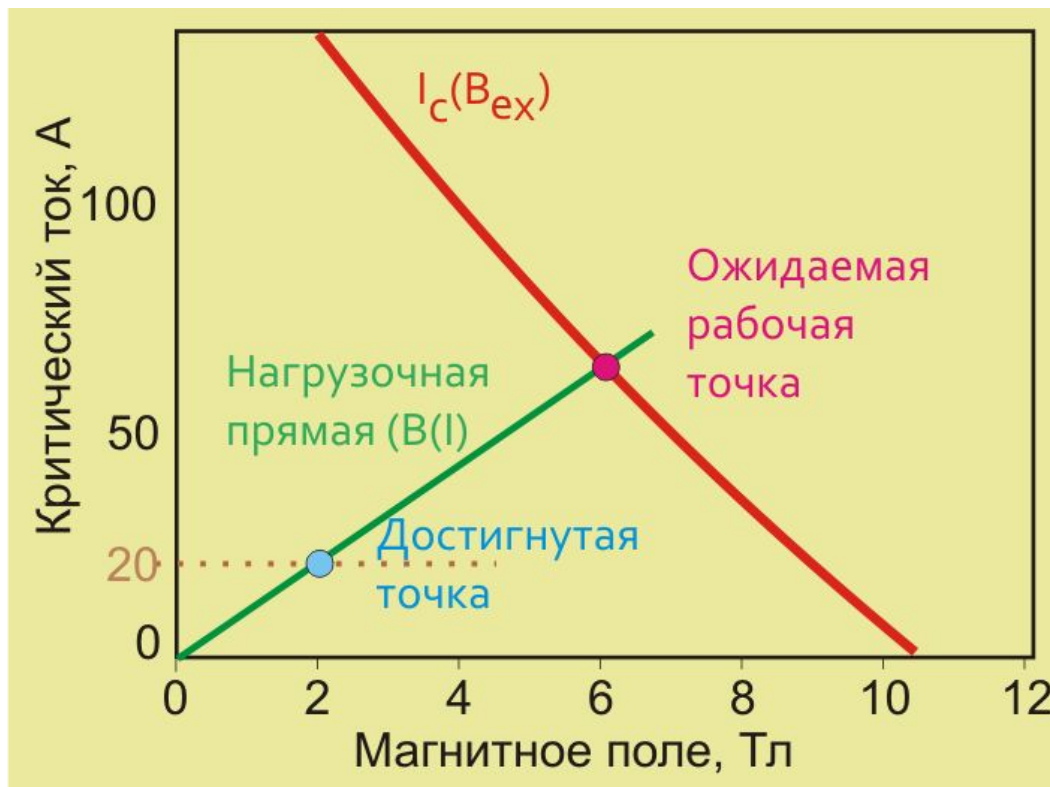
Лекция 6

Профессор Е.Ю.Клименко



Деградация и тренировка сверхпроводящих обмоток

Уже при испытаниях первых соленоидов в 1963-64 г.г. выяснилось, что достичь в них токов короткого образца не так-то просто. Создавалось впечатление, что проволока деградирует при намотке. Термин «деградация» сохранился до сих пор.



В шестидесятые годы существовал термин «двадцатиамперная катастрофа».

Вину за преждевременные переходы возложили на неучтенные тепловыделения в обмотке или токовводах, локально повышающие температуру выше критической точки провода при данных значениях поля и тока.

Причин для таких тепловыделений множество, их классифицируют по временным характеристикам (длительные, мгновенные) и по пространственным (точечные, объемные):

Длительные:

- Большое сопротивление в контакте между отрезками провода или в месте .. токоподвода,
- Тепловыделения в обмотке при изменении магнитного поля,
- Нарушения теплоотвода,
- Механический гистерезис материала обмотки,
- Неоднородность провода

Импульсные:

- Механические перемещения витков или токовводов,
- Скачки магнитного потока.
- Скачки деформации обмотки.

Большинство причин удастся исключить при конструировании обмотки.

Изучая проблемы деградации прежде всего следует принять во внимание величину действующих в обмотках сил.

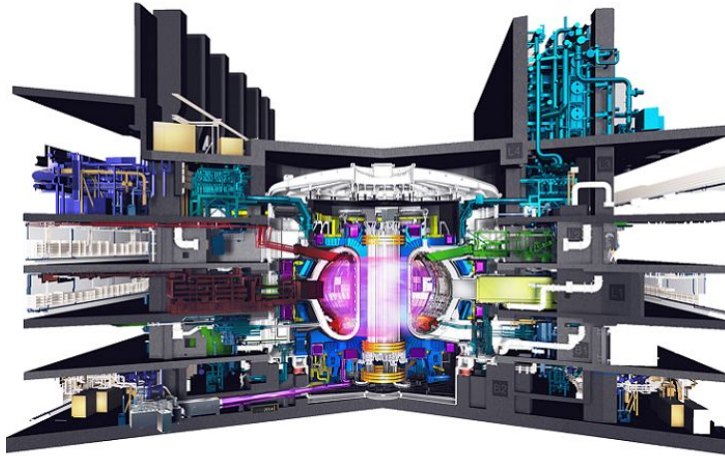
Сила действующая на сверхпроводящий провод с током I (А) в магнитном поле B (Тл) равняется $F=I \times B$ (Н/м).

Рассмотрим проблему на примере проекта ИТЭР.

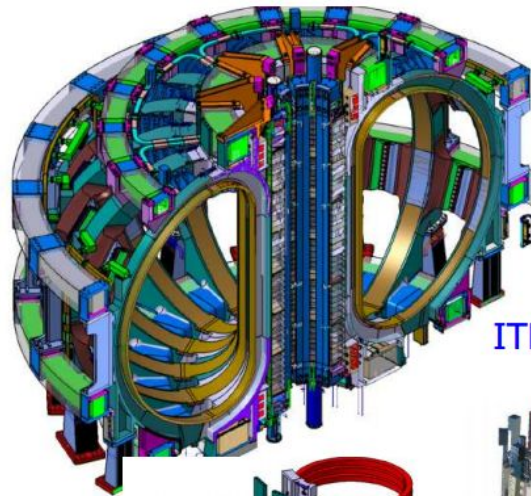
Это беспрецедентно дорогой (19 млрд. евро) проект, начатый в 1985 .

Пуск термоядерного реактора часто переносится.
В настоящее время срок 2025 год.

Международный термоядерный экспериментальный реактор ИТЭР, строительство в Кадараше (Франция)



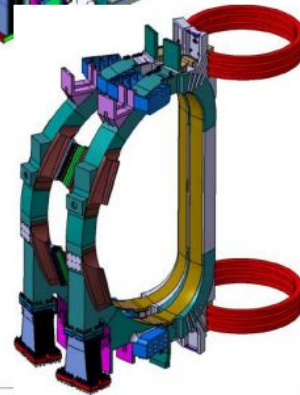
Рассмотрим проблему на примере проекта ИТЭР



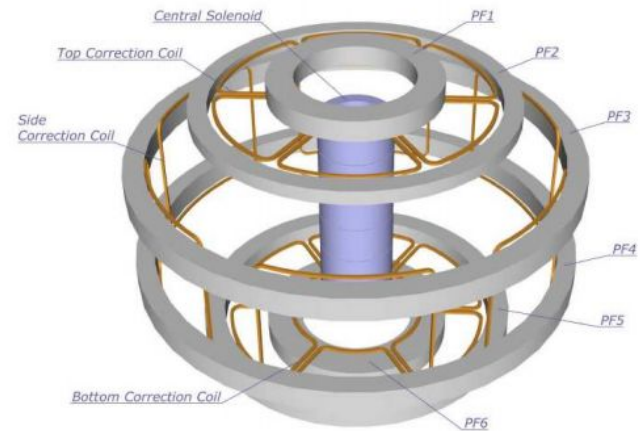
ITER Magnet System

- The ITER magnet system is made up of
 - 18 Toroidal Field (TF) Coils,
 - a 6-module Central Solenoid (CS),
 - 6 Poloidal Field (TF) Coils,
 - 9 pairs of Correction Coils (CC).

Pair of TF Coils



CS Coil



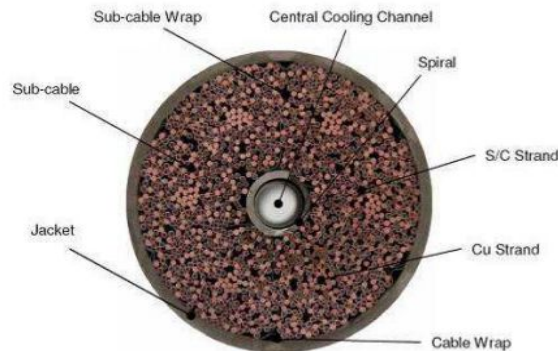
PF & CC Coils

Смета проекта 19 миллиардов евро!

В каждой из 18 секций тороидального поля 134 витка такого провода. Максимальное поле равно 13 Тл, ток в проводе 68 кА.

Сила, действующая на 1 метр провода, равна 884 кН.

ITER Conductors-1



X-section of 70kA ITER TF Conductor (CEA)

- ITER coils are wound from **Cable-In-Conduit Conductors (CICC's)**, relying on superconducting multifilament composite strands mixed with pure Cu strands/cores.
- The strands are assembled in a **multistage rope-type cable** around an open **central cooling spiral**.
- The cable and its spiral are inserted inside **a stainless steel conduit** which provides helium confinement.



Cooling Spiral



Final-Stage Cable (NFRI)



Stainless Steel Conduit (ASIPP)

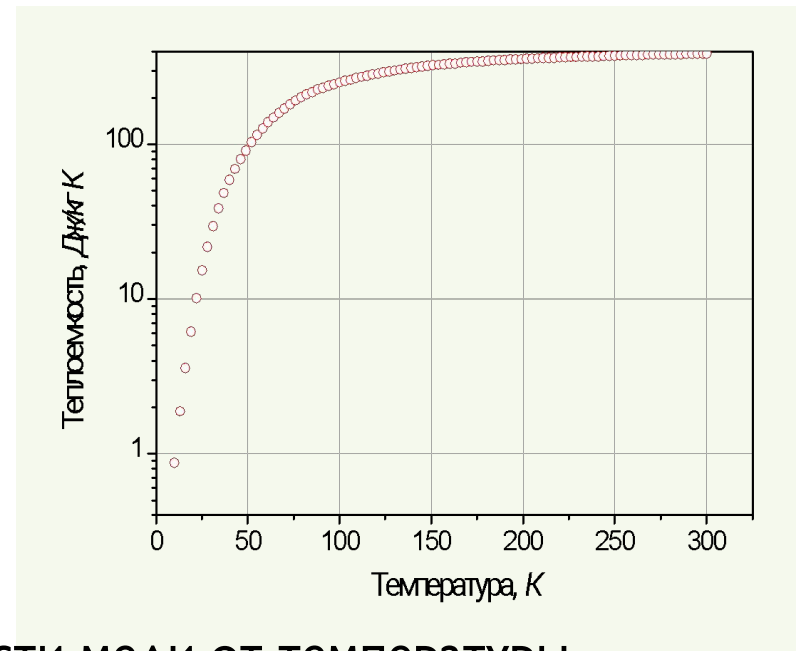
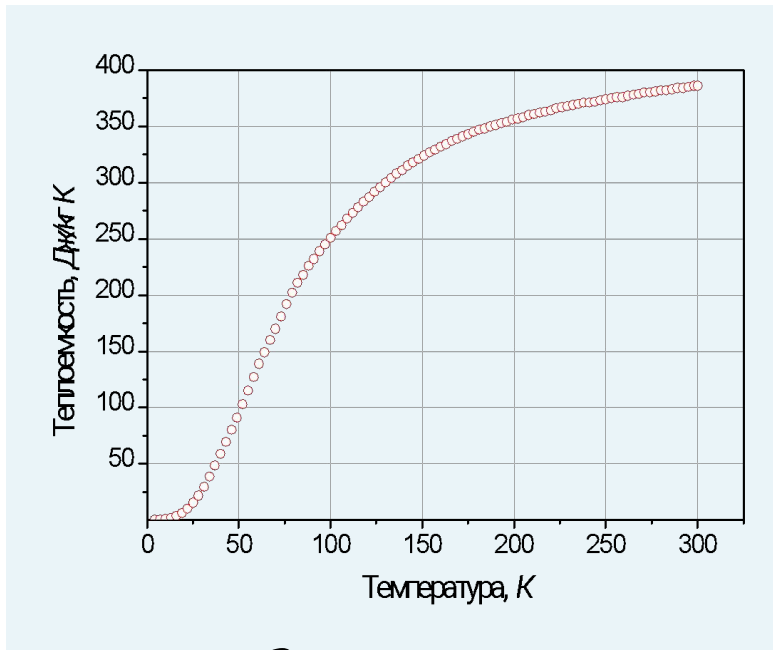


Действие такой силы на довольно рыхлый провод не может не привести к относительно серьезным перемещениям проволок с взаимным трением.

Чем опасно трение проволок при гелиевой температуре?

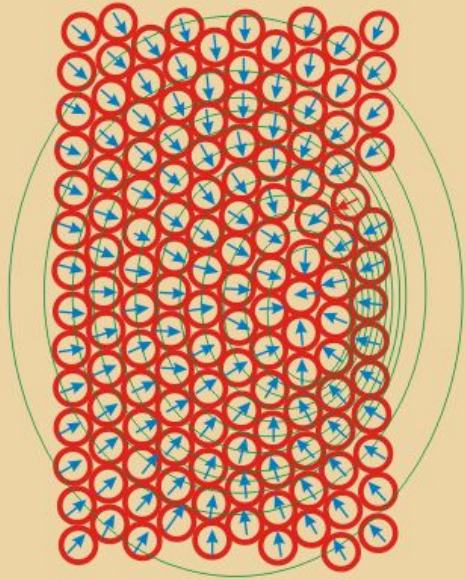
Дело в том, что теплоемкость материалов быстро уменьшается со снижением температуры и становится ничтожной при 4.2К

Даже небольшие тепловыделения перегревают сверхпроводящий провод выше критической температуры



Зависимость теплоемкости меди от температуры

Движение витка в обмотке – одна из причин деградации



Под действием силы виток из соседнего слоя передвинулся в место дефекта, испытывая трение о соседние витки.

Грубая оценка

Поле -5 Тл, Ток 500 А,

Теплоемкость 1 м проволоки

НТ-50 диаметр $\frac{1}{2}$ м 0.5 мм –

$C=7.45E-5 \times 10$

Сила, действующая на проволоку диаметром 0.5 мм – 2500Н/м.

Работа, совершаемая при перемещении проволоки на 0.5 мм, - 1.25 Дж/м.

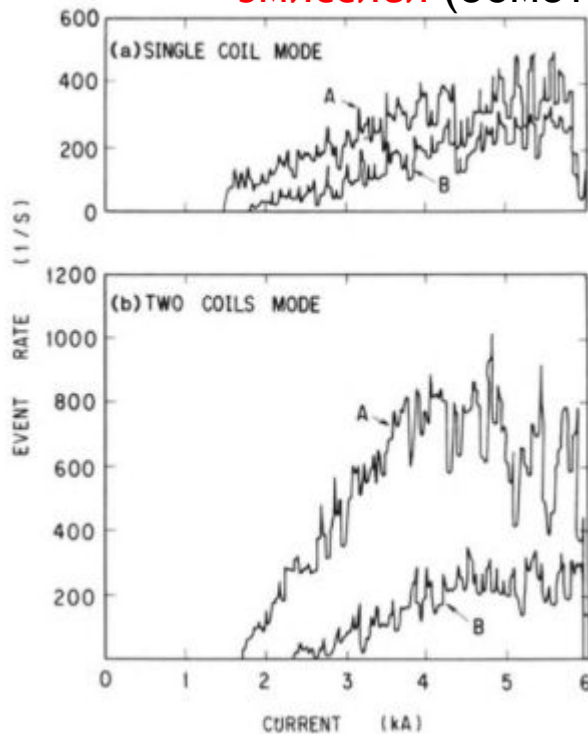
Такая энергия разогреет провод **до 29К.**

Какое перемещение разогреет провод до критической температуры (7К)?

На 0.3 мкм.

Но деформация обмотки под действием поля происходит именно за счет взаимного движения витков. Смещения оказываются еще большими.

Движение витков сопровождается **акустической эмиссией** (обмотка потрескивает)



Корреляция между акустическими и электрическими шумами в сверхпроводящей обмотке ЛСТ. А – полная акустическая эмиссия В – акустическая эмиссия, совпадающая с импульсами напряжения.

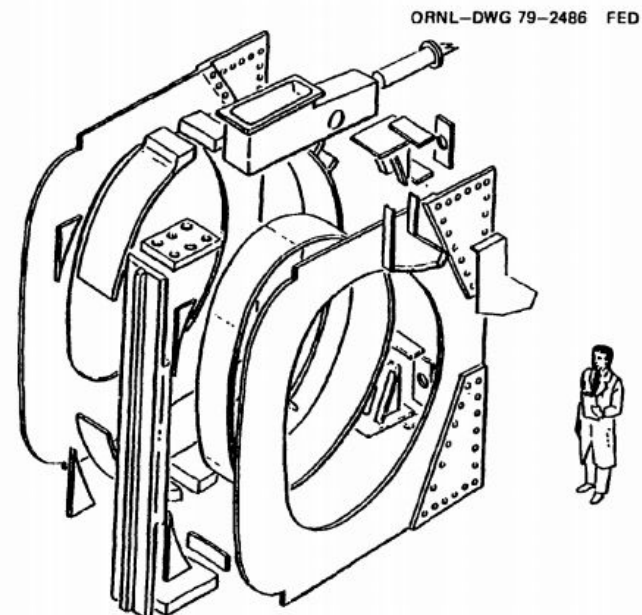
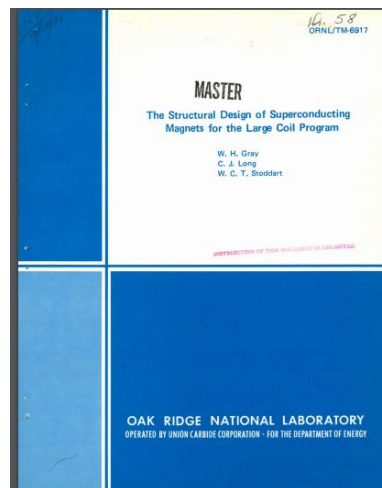
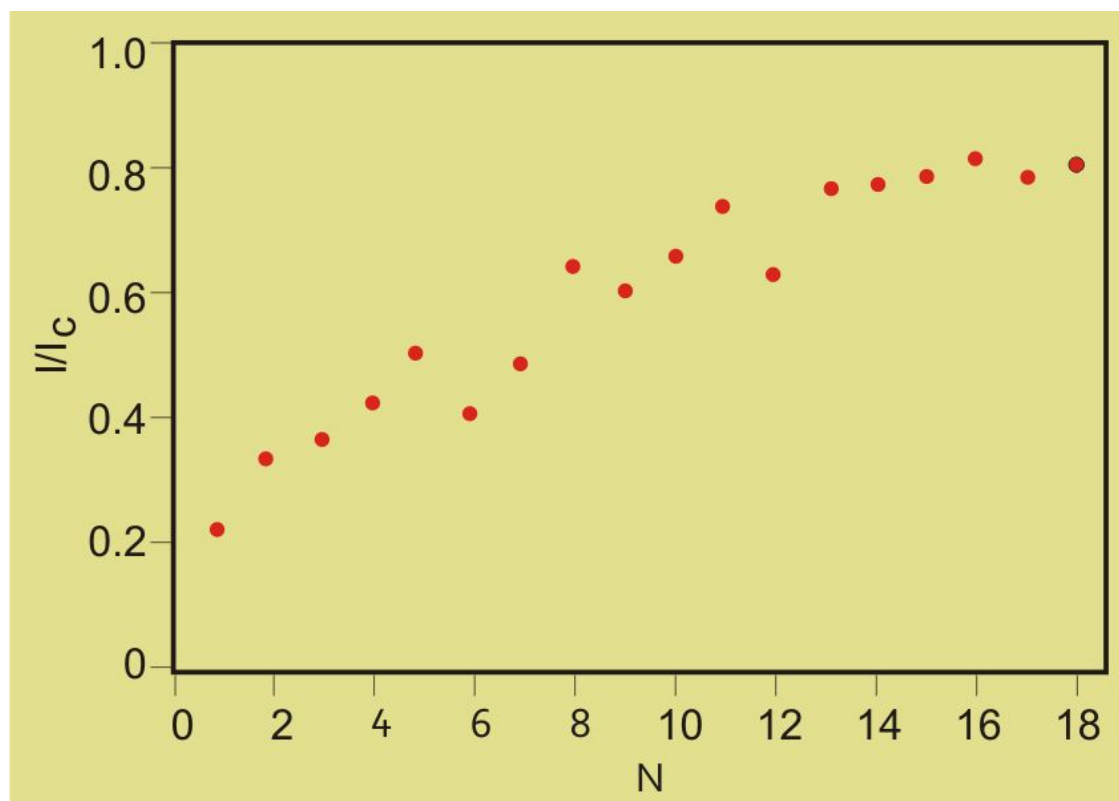


Fig. 6. The General Dynamics coil concept for the LCP.

Нередко деградация сопровождается «тренировкой» - постепенным увеличением достигнутого тока при последовательных вводах тока до перехода обмотки в нормальное состояние (quench).

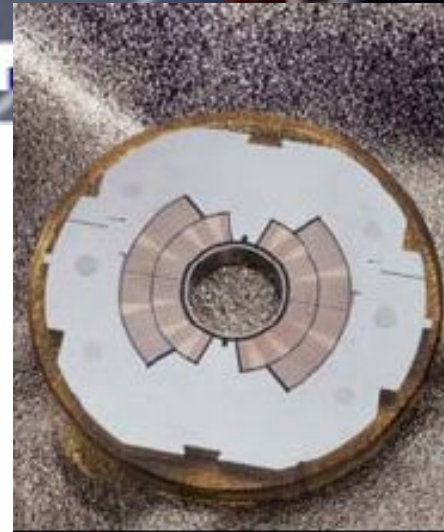


Это следствие того, что витки находят более устойчивое положение. Тренировка – рутинное мероприятие для СП диполей ускорителей

Тренировка диполей БАК

Опыт даже наиболее успешных научных установок нельзя использовать для коммерческих устройств! Признание деградации неизбежным злом делает коммерческие применения безнадежными. Было изготовлено 2500 LHC диполей. Все они были испытаны и оттренированы (12-15 раз). Около 2000 были отобраны для установки в тоннеле.

Такая процедура неприемлема для коммерческих устройств.

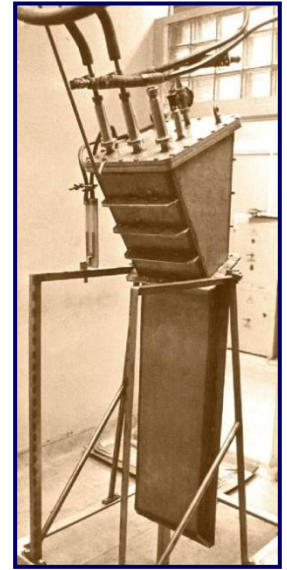
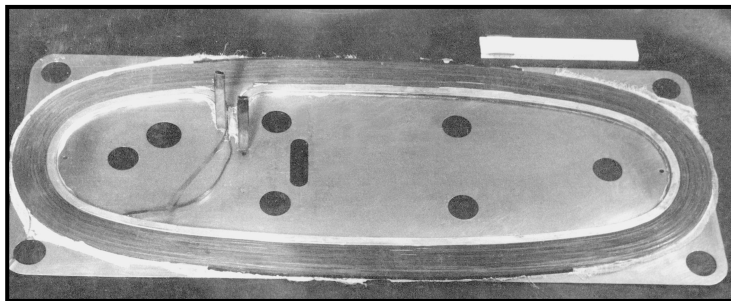
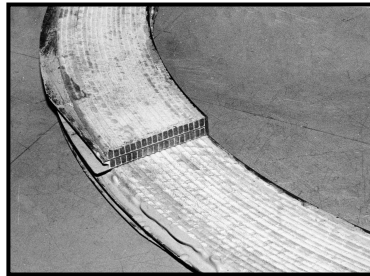
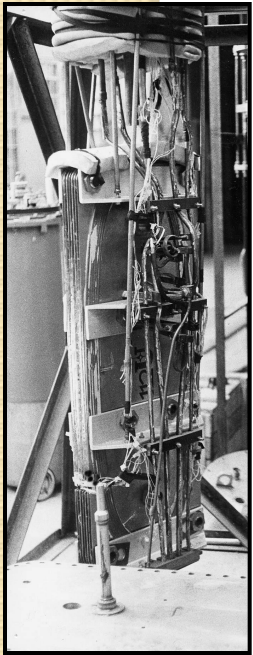


A set of LHC dipoles.

Рабочие характеристики коммерческих устройств должны быть гарантированы без испытаний!

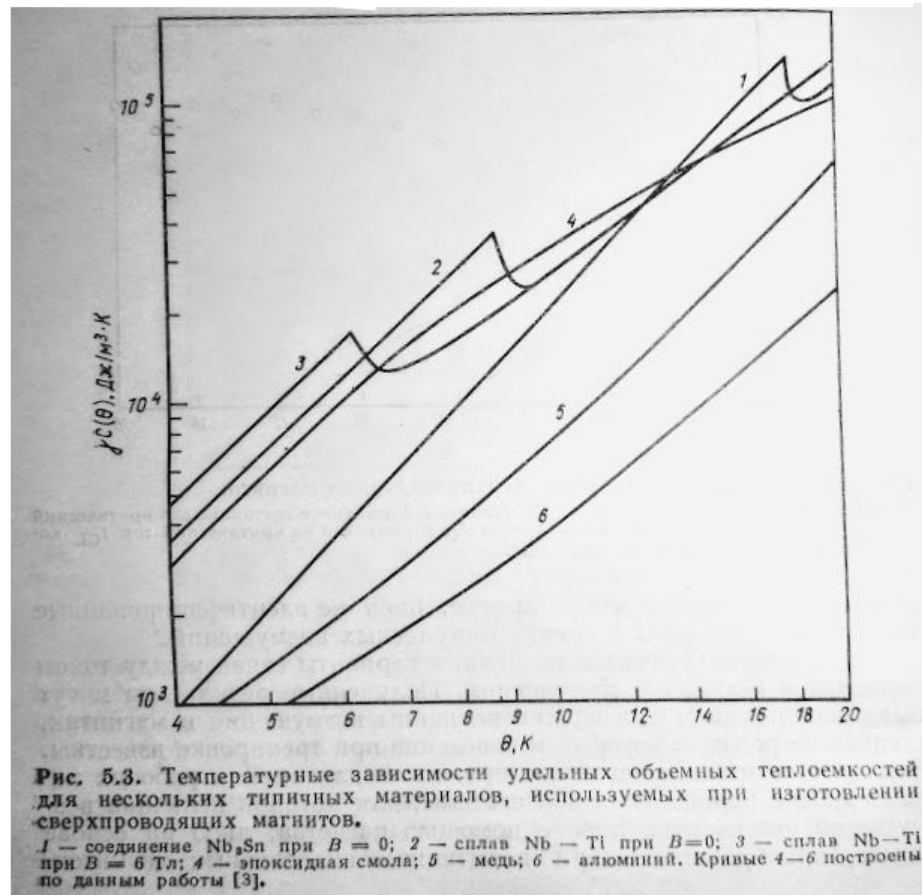
Есть ли выход?

Он предложен еще в прошлом веке. Конструкция обмотки должна содержать каркас, воспринимающий усилия при допустимой деформации. Сверхпроводник должен быть жестко фиксирован на этом каркасе и не использоваться для восприятия нагрузки.



Примеры успешных «ламинарных» обмоток

Причина высокой чувствительности низкотемпературных проводов к малым возмущениям заключается в низкой теплоемкости материалов при гелиевой температуре. Она в ~ 1000 раз меньше чем при комнатной температуре.



Весьма малого объемного тепловыделения достаточно для того, чтобы перевести провод в нормальное состояние. На самом деле эти величины еще меньше, поскольку в неоднородном профиле распределения магнитного поля в сечении провода заключена дополнительная энергия, превращающаяся в тепло при воздействии внешнего теплового импульса.

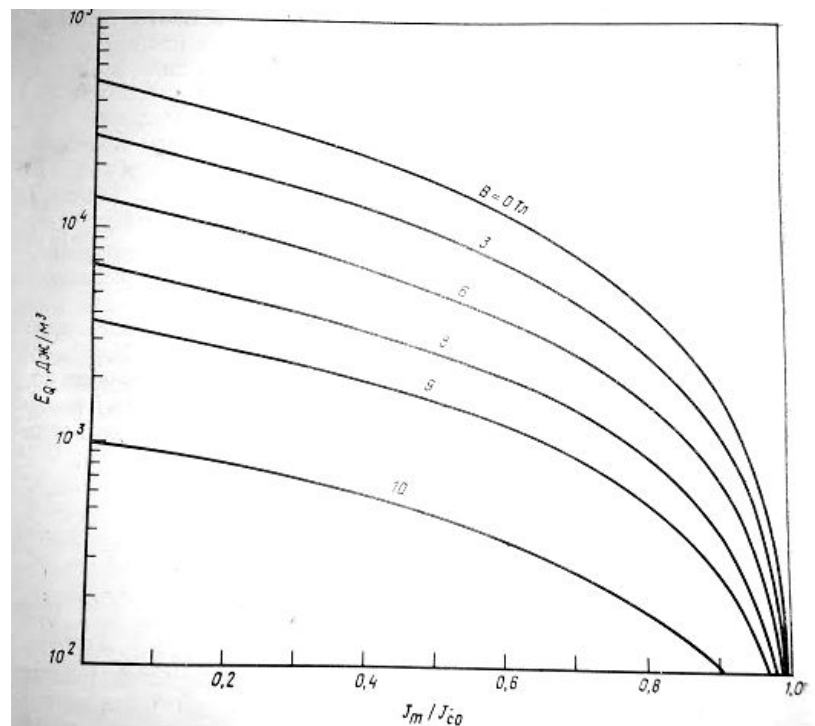


Рис. 5.7. Расчетные зависимости пороговой плотности энергии объемных возмущений, вызывающих переход «типичной обмотки», от плотности тока J_m в ней, отнесенной к критической плотности тока J_{c0} при температуре $\theta_0 = 4,2$ К (кривая *б* на рис. 5.4).

Точечные

ВОЗМУЩЕНИЯ

Пусть небольшой участок провода разогрет до температуры выше критической. Как поведет себя нормальная зона?

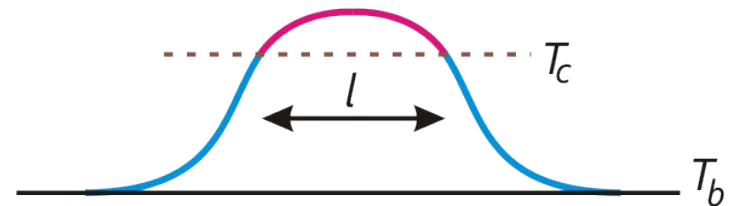
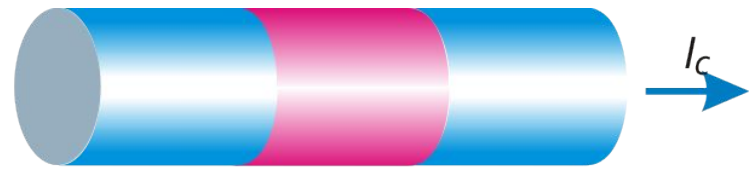
Условием равновесия будет равенство выделяющегося и отводимого тепла.

$$\frac{2kS(T_c - T_b)}{l} = j_c^2 \rho S l$$

Равновесная длина: назвали

$$l = \sqrt{\frac{2k(T_c - T_b)}{\rho j_c^2}}$$

такую длину



«минимальной распространяющейся зоной», потому что, если начальная длина превысит этот размер, то нормальная зона будет распространяться, поскольку тепловыделение больше возможностей теплоотвода. Если же начальная длина меньше, возникшая нормальная зона схлопнется.

Типичные параметры нобий-титановой проволоки: $j_c = 2 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$
 $\rho = 6.5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом м}$, $T_c = 6.5 \text{ K}$, $k = 0.1 \text{ Вт/(м К)}$, при этом $r = 0.5 \text{ мкм}$. Для разогрева проволоки диаметром 0.3 мм на такой длине достаточно 10 Дж .
 Если же в сечении проволоки половина меди, то $r = 255 \text{ мкм}$

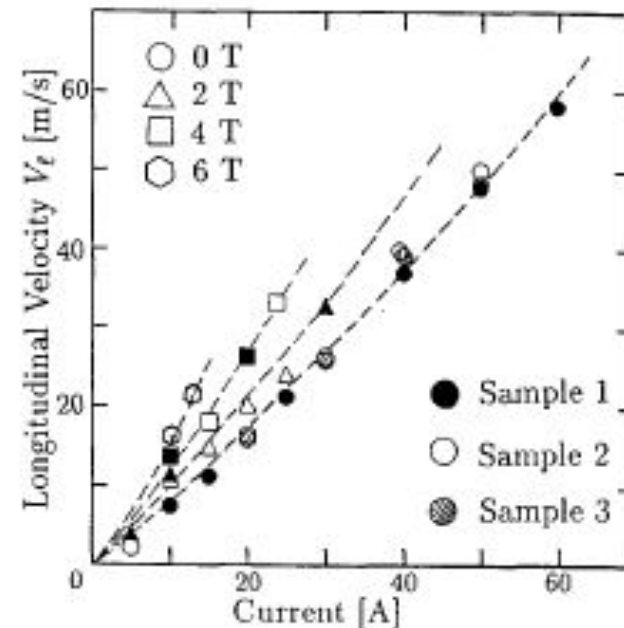
Распространение нормальной зоны

Рисунок дает представление о наблюдаемых скоростях распространения нормальной зоны в одиночном проводе.

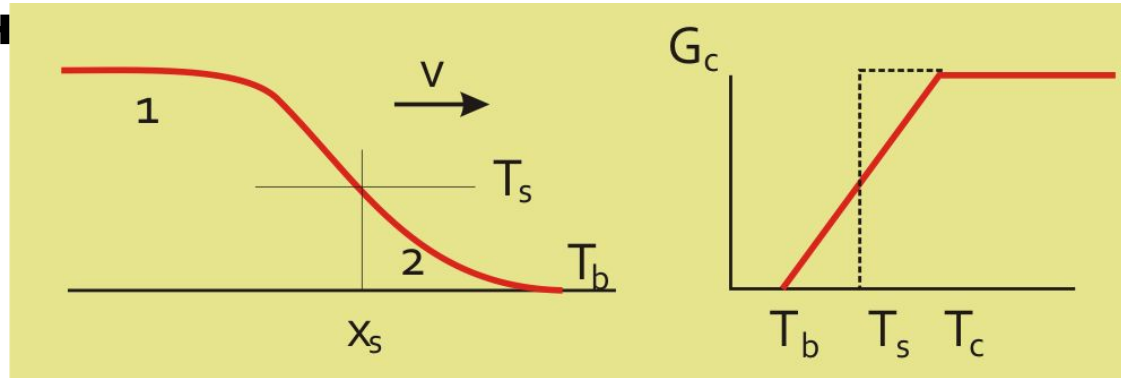
В плотной обмотке соленоидов нормальная зона распространяется не только вдоль провода, но и поперек. Скорость перехода обмотки в нормальное состояние при этом существенно возрастает.

Table.1 Wire specifications

Conductor	NbTi
Wire diameter	0.209mm
Insulation thickness	0.013mm
Number of filaments	15367
Filament diameter	0.93 μ m
NbTi:Cu10%Ni	1:2.3



Скорость распространения нормальной зон



Уравнение теплопроводности: $\frac{\partial}{\partial x} \left(kS \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \gamma CS \frac{\partial T}{\partial t} + GS = 0$

$G_1 = j^2 \rho$ $G_2 = 0$

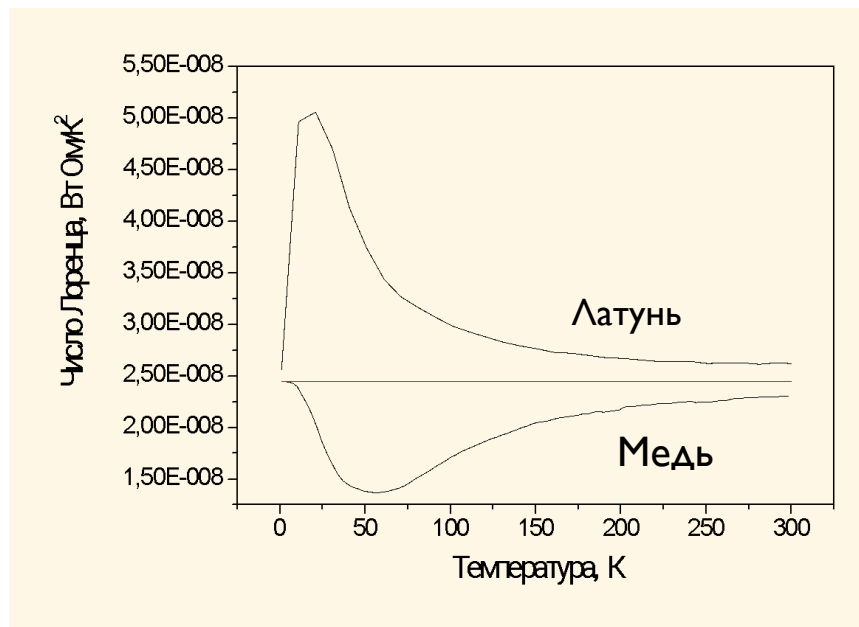
Если процесс установился температурный фронт движется со

скоростью v . Замена переменных: $\varepsilon = x - vt$ $\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial \varepsilon}$

Получаем $\frac{d^2 T}{d\varepsilon^2} + \frac{v\gamma C}{k} \frac{dT}{d\varepsilon} + \frac{j^2 \rho}{k} = 0$ $(1 - k \frac{dI_1}{d\varepsilon} = -k \frac{dT_2}{d\varepsilon}$

Результат: $v = \frac{j}{\gamma C} \sqrt{\left(\frac{\rho k}{T_s - T_b} \right)} = \frac{j}{\gamma C} \sqrt{\left(\frac{LT_s}{T_s - T_b} \right)}$

$L=2.45 \cdot 10^{-8}$ Вт Ом/К -Число Лоренца



Казалось бы, с точки зрения ограничения разогрева при импульсном возмущении нужно увеличивать теплоемкость провода, но при этом падает скорость распространения нормальной зоны, и момент перехода трудно зафиксировать, чтобы во время включить защиту.

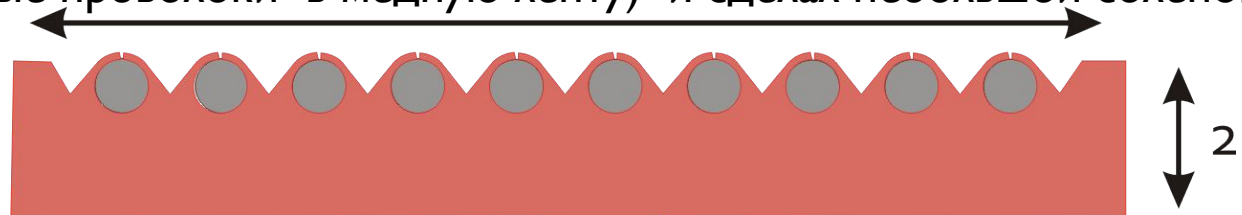
Стационарная стабилизация

В 1965 г. Дж.Зд.Стекли предложил использовать сверхпроводник с таким количеством меди, чтобы нормальная зона в нем не могла существовать.

Критерий Стекли: $\alpha = \frac{j_c^2 \rho S}{Ph(T_c - T_b)} < 1$ В числителе генерация

тепла на единице длины провода, в знаменателе теплоотвод с этой длины в жидкий гелий. В то время не были еще предложены другие способы охлаждения обмоток, кроме погружения в ванну с жидким гелием. Здесь плотность тока отнесена к полному сечению провода.

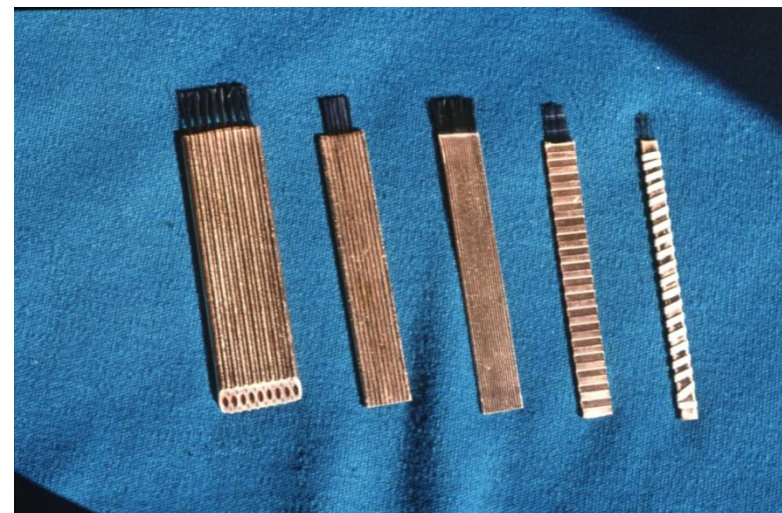
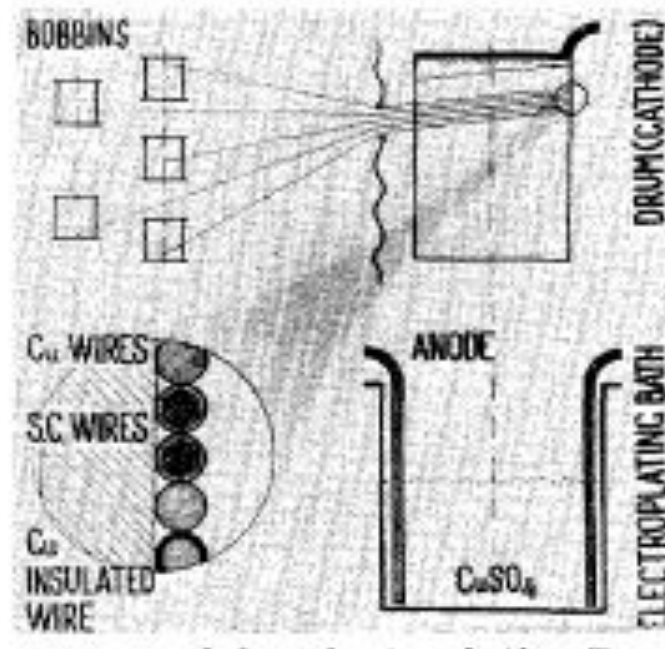
Стекли изготовил приблизительно такой провод (закатал ниобий-циркониевые проволоки в медную ленту) и сделал небольшой соленоид,



в котором деградация полностью отсутствовала. Эта идея лет на 5-7 завоевала весь сверхпроводящий мир.

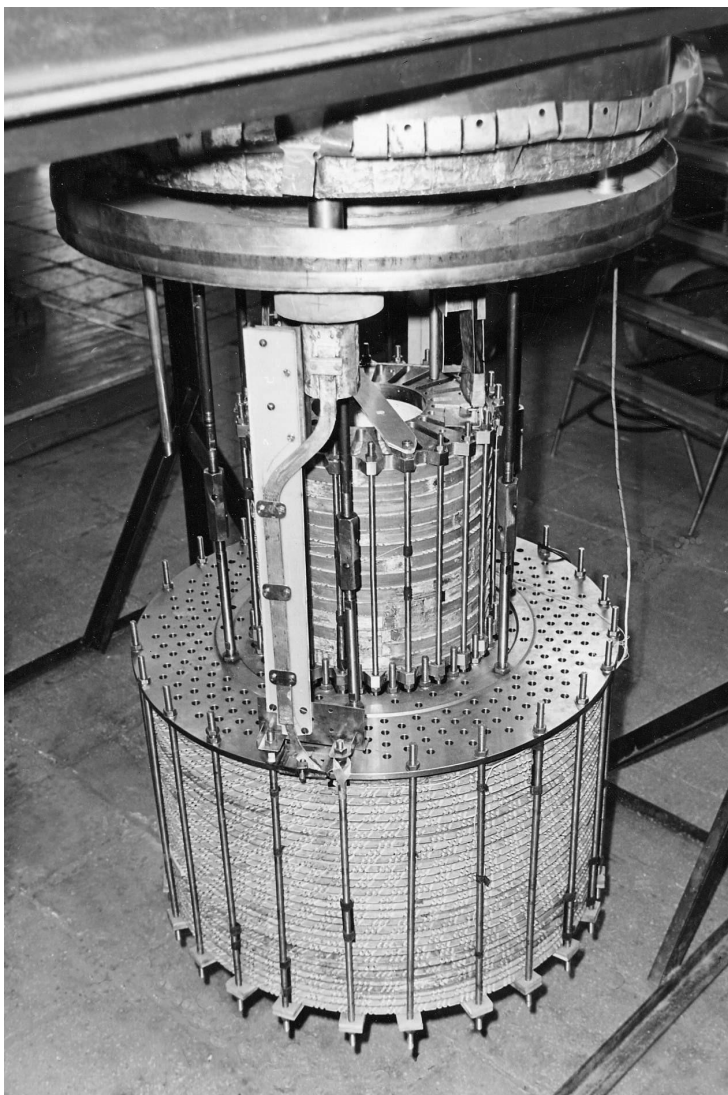
Гальваническая шина Курчатовского института

В 1965 г. в КИАЭ был предложен оригинальный способ изготовления стационарно стабилизированного провода, позволяющий изготавливать провода с количеством меди (RRR=800), точно соответствующим расчету их стабильности

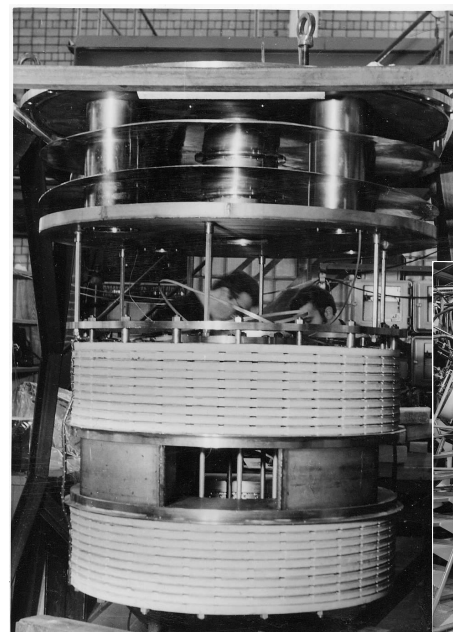


Магниты из гальванического провода

КС-250



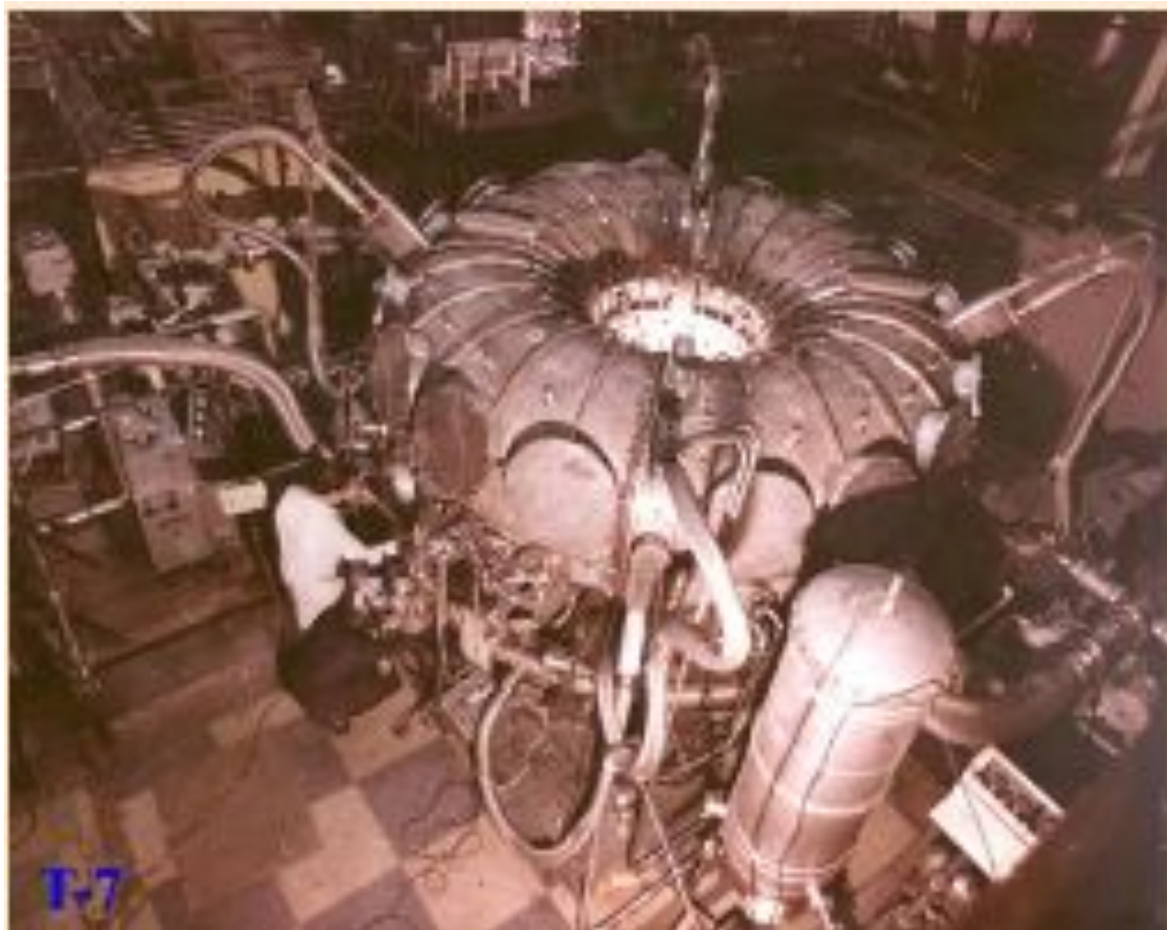
Максихин



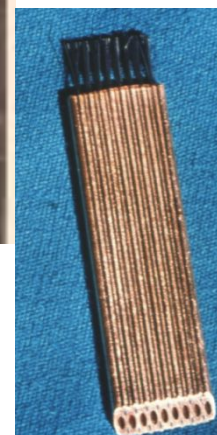
МГД
ИМ-08



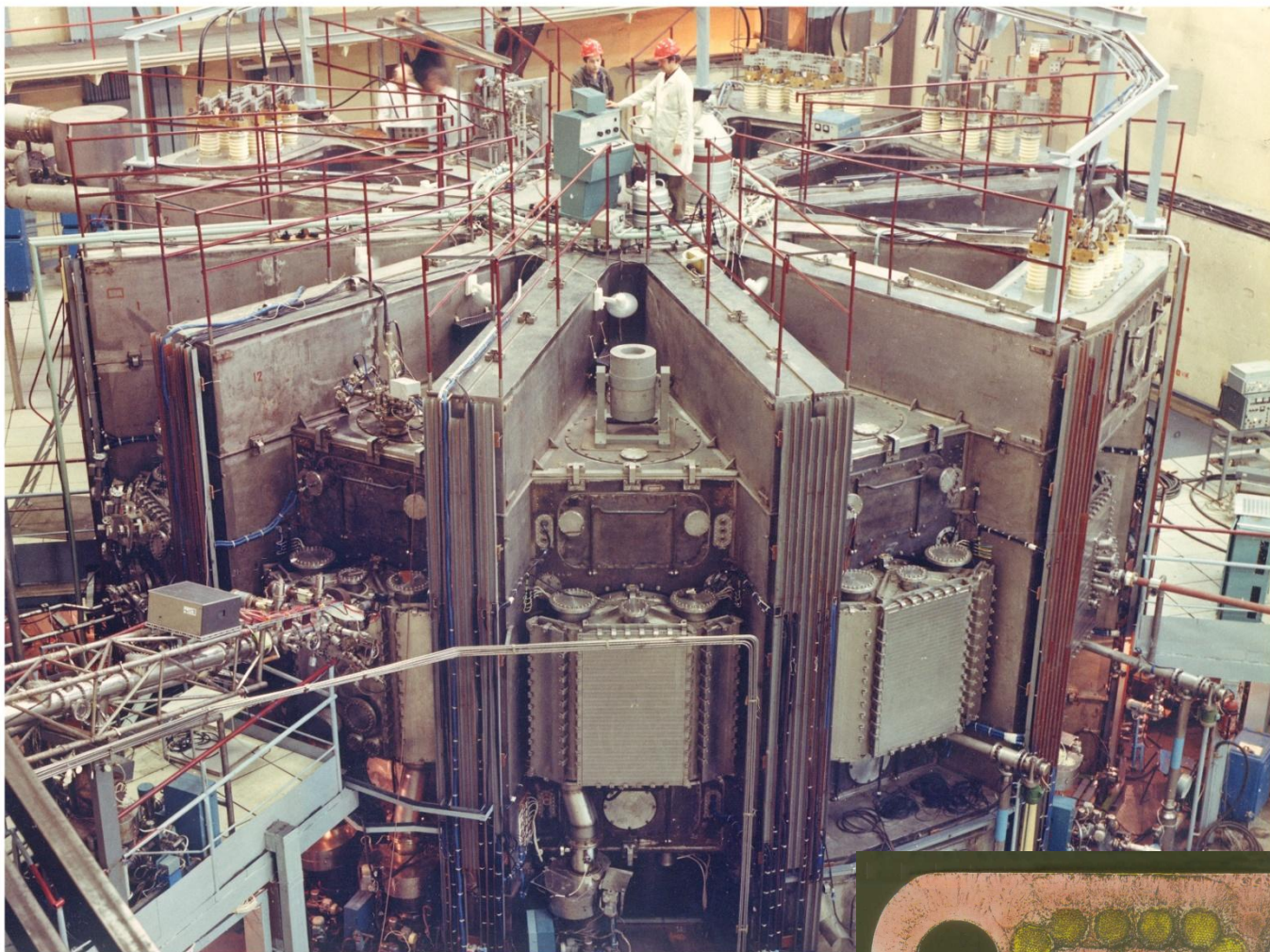
Магниты из гальванического провода



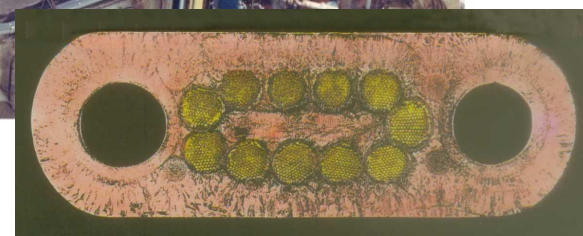
Токамак Т-7



Магниты из гальванического провода



Токамак Т-15





**Спасибо за
внимание**