

## Сопоставление эффективностей ВТСП и НТСП магнитов

Е.Ю. Клименко

РНИЦ «Курчатовский Институт» 123182, Москва, Россия

Открытие ВТСП материалов стоит в ряду наиболее интригующих физических открытий прошлого века. Оно выделено тем, что именно с высокотемпературной сверхпроводимостью общественное мнение заранее связало надежды на внедрение сверхпроводящих устройств в мировую энергетику и устранение разорительных омических потерь. Преимущества высокотемпературных сверхпроводящих обмоток перед имеющими уже длительную историю низкотемпературными казались столь очевидными, что большинство имевшихся проектов были переориентированы на новые материалы, а исследования уже созданных макетов прекращены без проведения убедительного анализа полученных результатов. К сожалению, весьма радикальные изменения в научной и технической политике были аргументированы скорее эмоционально, чем рационально. Безусловно верный аргумент о более высокой стоимости охлаждения до температуры кипения гелия, чем азота не был подкреплён разумной оценкой ожидаемой выгоды от перехода на более высокий температурный уровень.

Прежде всего необходимо выделить реальный эффект от применения высокотемпературных устройств в будущем из эффекта применения вообще сверхпроводящих устройств, например, существующих уже около полувека низкотемпературных сверхпроводящих магнитов. На Рис.1 приведена зависимость отношения затрат мощности на поддержание рабочей температуры ниобий-титановых цилиндрических соленоидов к омическим потерям в медных обмотках тех же размеров и с той же плотностью тока. Выбор координатных осей позволяет отнести этот результат к обмоткам различных размеров и генерируемых полей, определяемых размерами поперечного сечения обмотки относительно ее внутреннего радиуса  $a_1$ :

$$\beta = h / 2a_1, \quad \alpha = a_2 / a_1 = B_0 / (\mu_0 j a_1)$$

Здесь  $B_0$  – поле в центре соленоида. Мощность, расходуемая на поддержание рабочей температуры, компенсирует теплоприток к полной поверхности соленоида  $0.1 \text{ Вт/м}^2$  на уровне 5 К и теплоприток к экрану  $1 \text{ Вт/м}^2$  на уровне 78 К.

Из рисунка видно, что затраты мощности на поддержание рабочей температуры НТСП магнита составляют менее 0.01% от затрат на омические потери в медных соленоидах. Эта весьма малая величина и определяет перспективную выгоду применения ВТСП обмоток, даже работающих при комнатной температуре.

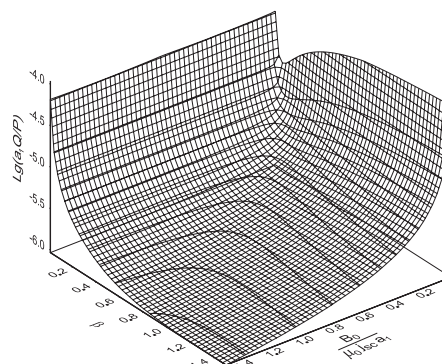


Рис. 1. Отношение затрат на охлаждение ниобий-титановых цилиндрических обмоток к омическим потерям в аналогичных медных обмотках.

Наиболее впечатляющим аргументом в пользу ВТСП устройств, работающих при азотной температуре, является сопоставление КПД охлаждения до 80 и до 5К. Если в идеальном случае цикла Карно отношение этих коэффициентов равно 25, то в реальных устройствах оно достигает 200. Но и этот аргумент оказывается существенным лишь в том случае, если теплопритоки к обоим этим температурным уровням одинаковы. НТСП устройства всегда окружают тепловым экраном, обычно этот экран имеет температуру жидкого азота. Этот экран уменьшает теплоприток к устройству в  $(300/80)^4 = 198$  раз. В действительности за счет того, что с помощью, например, суперизоляции теплоприток к уровню 80К можно заметно снизить, это отношение несколько меньше, но, во всяком случае, больше 20.

Преимущества повышенной рабочей температуры могут проявиться в том случае, если рефрижератор будет компенсировать не внешний теплоприток, а тепло, генерируемое в обмотке, например, в обмотке, работающей с переменным током. Сейчас вряд ли можно предугадать, каким образом удастся преодолеть низкую технологичность новых материалов и такой свойственный им недостаток, как сильная анизотропия пиннинга. Хотя в Европе в рамках проекта «Акрополис» была предпринята попытка создания ВТСП проводов с пониженными потерями, ее вряд ли можно считать успешной.

Специалисты, имеющие опыт работы с жидким гелием, и еще в большей степени люди, не имеющие такого опыта, высоко ценят удобство охлаждения обмотки жидким азотом. Его легко переливать и не надо заботиться о сохранении газа. Двадцать-тридцать лет назад этот аргумент в пользу ВТСП был бы неопровержимым. В те времена специали-

сты были озабочены грядущим истощением доступных запасов гелия на Земле. В США, например, Ч.Лаверик выступал с проектом создания стратегического запаса газообразного гелия для обеспечения эксплуатации сверхпроводящих устройств в будущем. Теперь эта проблема потеряла остроту. Компактные газовые рефрижераторы позволяют обеспечивать любой практически интересный уровень температур с небольшим и не расходуемым количеством гелия. КПД этих устройств далек от идеального, но выгода от применения сверхпроводящих устройств столь велика, что увеличение мощности компрессора на порядок в большинстве случаев легко пережить. Нет сомнений, что большинство сверхпроводящих магнитов уже в недалеком будущем будут охлаждаться газовыми рефрижераторами, а магниты, погруженные в жидкий хладагент, также как охлаждаемые потоком жидкого гелия внутри провода, будут отнесены к периоду варварства в прикладной сверхпроводимости.

Температурный уровень, обеспечиваемый газовым рефрижератором, не привязан к температуре кипения какого-либо хладагента. Поскольку критический ток ВТСП проводов быстро возрастает при снижении температуры, а теплоприток к обмотке можно существенно ограничить с помощью пассивного экрана, оптимальная температура использования ВТСП устройств оказывается в той же области, где работают низкотемпературные обмотки.

На Рис.2 приведены оценки капитальных и эксплуатационных затрат для магнита с полем 2 Тл на обмотке и внутренним диаметром 0.5 м из ленты Bi2223 в сравнении с затратами на такую же обмотку из ниобий-титанового провода. Цена ВТСП-ленты принята равной 10 \$/м кА. Она в 18 раз ниже современной и вряд ли будет достигнута. Современная цена ниобий-титановой проволоки - 1 \$/м кА. Расчеты проведены для двух плотностей тока в проводе: достигнутой в настоящее время и перспективной, при которой объявленная цена едва покроет стоимость исходных материалов. Полевая зависимость относительных критических токов для двух ориентаций магнитного поля взята из рекламы фирмы ASC.

Оказывается, что даже в перспективе ВТСП обмотки будут работать не при 80К, а значительно ниже. Капитальные затраты на обмотку хотя бы с полем 2 Тл и рабочей температурой 80К не удастся оправдать в разумные сроки.

Нелепо было бы думать, что ниобий-титановые и ниобий-оловянные провода навсегда останутся оптимальным обмоточным материалом для сверхпроводящих обмоток. Наверняка возникнут новые материалы и провода. Но их критическая температура – параметр далеко не первостепенной важности. Новые материалы смогут вытеснить современные только в том случае, если будут дешевле, будут обладать большей плотностью тока в более высоких полях и будут технологичны.

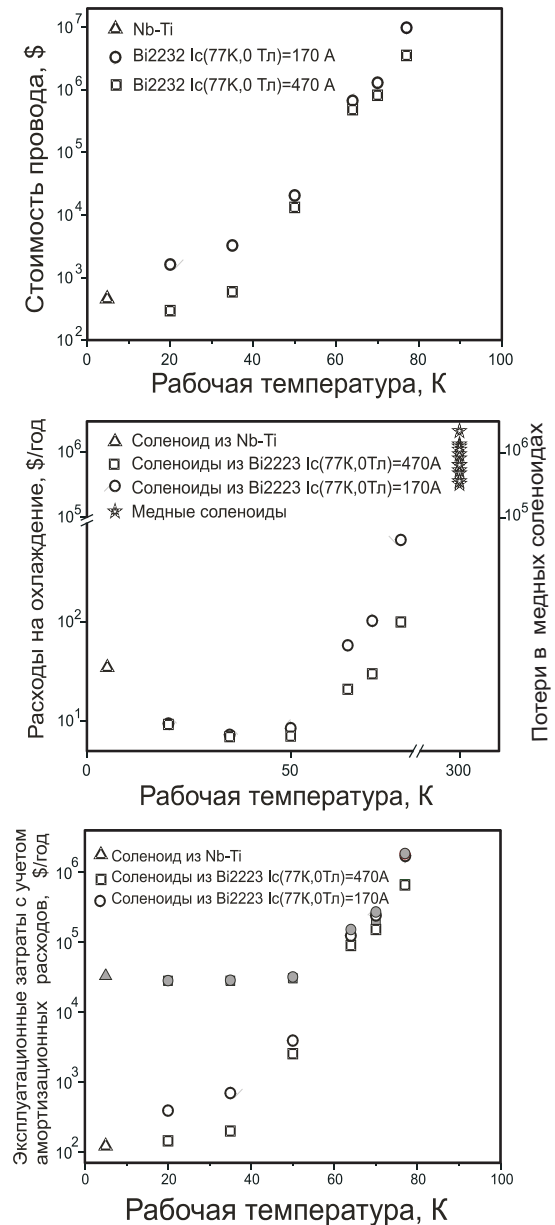


Рис.2 Результаты оценок стоимости обмоток из ленты Bi2223 в зависимости от их рабочей температуры, эксплуатационные затраты с амортизационными отчислениями с учетом (заполненные символы) и без учета стоимости криокулеров