

УДК 621.039.626

Сверхпроводящий тороидальный соленоид Токамак-7

ИВАНОВ Д. П., КЕЙЛИН В. Е., СТАВИССКИЙ Б. А., ЧЕРНОПЛЕКОВ Н. А.

Сооружение установки Т-7 — первого в мире токамака со сверхпроводящими обмотками тороидального магнитного поля — преследует две цели: приобретение опыта создания и использования токамаков со сверхпроводящими обмотками, необходимого в силу неизбежности применения сверхпроводящих обмоток в термоядерных электростанциях будущего, основанных на магнитном удержании плазмы, а также упрощение и повышение эффективности экспериментальных работ по физике плазмы на современных установках. Известно, например, что у работающей в ИАЭ им. И. В. Курчатова установки Т-10 по условиям охлаждения обмоток интервал между рабочими импульсами составляет 15—20 мин. Это сильно затрудняет получение режимов разряда с хорошей воспроизводимостью и проведение экспериментов, требующих большой статистики. В то же время в ИАЭ уже есть многолетний опыт работы на экспериментальных плазменных установках со сверхпроводящими магнитами: пробочная ловушка обычной геометрии Огра-3, успешно работавшая с начала 70-х гг., и система с обмоткой бейсбольной конфигурации Огра-3Б заменившая ее в настоящее время [1].

Переход к использованию сверхпроводящих обмоток в сооружаемых экспериментальных плазменных установках представляется более рациональным и убедительным путем к созданию сверхпроводящих магнитов термоядерных электростанций, чем только длительные и дорогостоящие исследования крупных модельных обмоток — путь, который иногда называют «американским» в отличие от «русского» [2].

Установка Т-7, мало отличаясь по своим геометрическим параметрам от Т-10, будет использована для быстрого накопления информации в средних полях и даст, таким образом, возможность разгрузить Т-10 от работы в этих режимах.

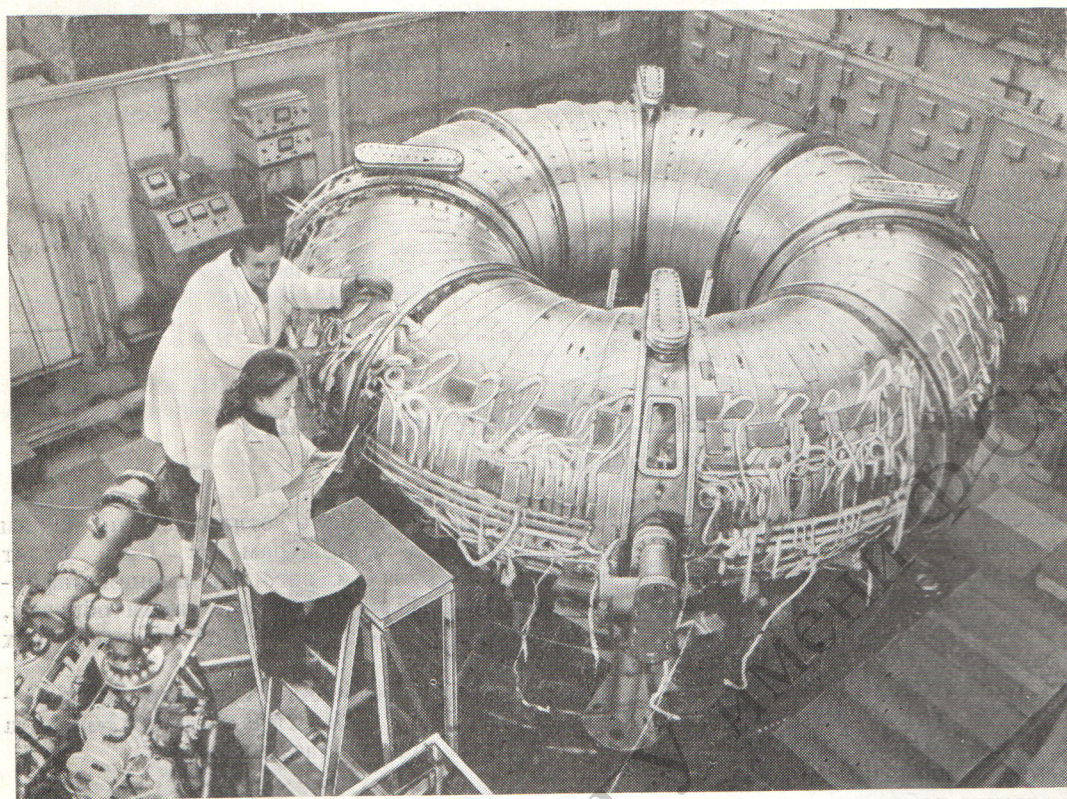
Параметры и особенности конструкции. Основные параметры сверхпроводящего магнита Т-7 (см. рисунок) приведены ниже:

Большой радиус тора, см	122
Внутренний радиус рабочей камеры, см	35
Средний радиус катушек, см	50
Толщина намотки, см	15
Объем поля, м ³	6
Рабочая температура, К	4,5
Масса, охлаждаемая до рабочей температуры, Т	12
Хладопроизводительность рефрижератора, Вт	400
Предельное расчетное поле на оси тора B_0 , Т	3
Максимальное поле на обмотке, Т	5
Ток при $B_0 = 3$ Т, кА	6
Средняя плотность тока при $B_0 = 3$ Т, А/см ²	$4 \cdot 10^3$
Запас энергии при $B_0 = 3$ Т, МДж	20

Основные особенности конструкции следующие:

1. Использована циркуляционная система охлаждения обмоток жидким гелием. Сверхпроводящая магнитная система (СМС) состоит из 48 двойных галет по 60 витков, соединенных по току последовательно, а по гелию параллельно. Каждая галета намотана электролитической шиной длиной 200 м, содержащей 9 каналов диаметром по 2 мм. От каждой галеты выведено наружу по одному каналу для регулирования распределения потока хладагента.

2. Все пондеромоторные усилия (сдвиг к оси тора, изгибающие и опрокидывающие момен-



Общий вид установки

ты и пр.) воспринимаются тороидальным арочным каркасом, состоящим из 96 клиновидных колец. На более теплые элементы конструкции через опоры передается только вес СМС. Этот же каркас воспринимает весь лучистый теплопоток от азотного экрана. Каркас охлаждается гелием, проходящим по припаянным к корпусам гаек трубкам после выхода из каналов обмотки. Это должно значительно снижать паросодержание гелия в обмотке.

3. Азотные экраны, окружающие СМС, используются также для уменьшения возмущающего влияния полоидальных и управляющих полей. С этой целью они сделаны из толстой (15 мм) меди. Внешний и внутренний экраны в восьми сечениях тора соединены между собой так, что они образуют замкнутые контуры вокруг СМС. Время затухания токов в этих контурах составляет ~ 1 с. Это должно обеспечить значительное электромагнитное экранирование СМС от переменных полей.

4. Криостат тороидальной формы максимально приближен к СМС. Все остальные обмотки (индуктор, управляющие и др.) рас-

положены снаружи криостата, но достаточно близко к медному кожуху, т. е. фактически к плазме, так как полоидальное поле внутри кожуха не проникает. Таким образом обеспечивается хорошая связь индуктора с плазмой, позволяющая получить большой ток в плазме при данном потоке в железном яре. Кроме того, такое расположение делает вспомогательные обмотки более доступными для обслуживания и ремонта. С этой же целью тоководы вынесены из криостата.

5. Теплоизоляционное пространство криостата и рабочая камера имеют независимую откачку. Рабочая камера откачивается через диагностические люки, проходящие между галетами в четырех сечениях тора. Это позволяет не нарушать теплоизоляционный вакуум во время напуска газа для получения плазмы или из-за газоотделения со стенок камеры после разряда. Теплоизоляционный вакуум при этом является как бы охраняемым для вакуума в рабочей камере.

6. Люки на кожухе криостата обеспечивают легкий доступ к сосредоточенным под ними местам многочисленных паяк трубок охлаж-

дающих каналов (~ 2000) и керамическим электроизолирующим разъемам (~ 200) на гелиевых коллекторах.

История сооружения установки. Установка Т-7 была задумана в начале 70-х гг. В ИАЭ им. И. В. Курчатова были проведены экспериментальные работы в обоснование основных решений СМС установки Т-7. В частности, проделан большой цикл работ по циркуляционным СМС из такого же проводника [3], а также эксперименты по изучению работоспособности шины в переменных полях. Затем были разработаны эскизный и технический проекты установки. Выпуск рабочей документации и изготовление корпусов галет и криостата с тоководами в течение 1974—1976 гг. был осуществлен в НПО «Криогенмаш». Намотка галет, монтаж и испытания с охлаждением и вводом тока отдельных секций СМС («восьмушек») проведены в ИАЭ в 1975—1976 гг. Результаты этих испытаний опубликованы в 1976 г. [4].

При испытаниях отдельных секций ток перехода в нормальное состояние составлял от 4,5 до 5,3 кА, причем всегда переход происходил в периферийных галетах (на 8 секциях ~ 200 переходов), даже в тех случаях, когда в центральные галеты вводился дополнительный ток, так что суммарный ток составлял 5,9 кА. Это обстоятельство было объяснено скачкообразным распадом диамагнитных токов, энергия которых в периферийных галетах должна быть максимальной. Наведение больших диамагнитных токов связано с конструкцией шины (параллельные сверхпроводящие элементы) и с наличием в «восьмушках» компонента поля, перпендикулярного широкой стороне шины, который, естественно, максимален в периферийных галетах. Такая трактовка дала основание считать результаты испытаний секций положительными (с учетом значительно меньшей роли этих эффектов в тороидальной СМС). За 1977 г. была проведена сборка всей установки силами ИАЭ и НПО «Криогенмаш» и в декабре прошли криогенные испытания.

Результаты испытаний. СМС была охлаждена до 50 К за 5 сут, причем в начальный период темп охлаждения составлял ~ 100 град./сут. При этом не произошло ни каких-либо нарушений в установке, связанных с термическими деформациями, ни ухудшения герметичности криостата. Полученные тепловые, гидравлические и электрические характеристики системы соответствовали расчетным. После некоторых доработок, коснувшихся в основном системы криогенного обеспечения, в конце

марта — начале апреля 1978 г. были проведены первые полные испытания соленоида.

Рабочая температура СМС ($\sim 4,5$ К) была достигнута за 4 сут. Охлаждение производилось холодильной установкой ХГУ-250/4,5, серийно выпускаемой НПО «Гелиймаш» и несколько модифицированной с его участием. Хладопроизводительность установки в рефрижераторном режиме ~ 400 МВт при 4,5 К. Поддержание рабочей температуры, а также наполнение жидким гелием, прошедшим через СМС, бачков на тоководах (которые предназначены для предотвращения распространения нормальной зоны от тоководов в глубь обмотки) оказалось возможным даже при работе этой холодильной установки в ожигительном режиме. Расход гелия через СМС, измеренный с помощью диафрагм на регулирующих трубках, составлял ~ 8 г/с. При этом расходе полному испарению гелия соответствовал бы теплоприток на гелиевом уровне ~ 150 Вт. Поскольку, в действительности, паросодержание выходящего гелия было далеко от 100% (для поддержания уровня в бачках тоководов достаточно было направлять в них только малую долю общего выходящего потока), реальный теплоприток к СМС значительно ниже 150 Вт. Разность давления на входе и выходе из СМС была $\sim 0,15$ кгс/см² (давление входа 0,3 кгс/см², давление выхода $\sim 0,15$ кгс/см²).

После охлаждения в СМС многократно вводился ток. Оказалось, что при средней скорости ввода ~ 1 кА/ч в СМС возникали значительные возмущения, проявлявшиеся в виде скачков напряжения разбаланса мостовой схемы обнаружения нормальной зоны и сопровождавшиеся необратимым переходом в нормальное состояние уже при токе 1,2—1,5 кА. При переходе в нормальное состояние запасенная в СМС энергия выводилась на внешнее сопротивление 0,17 Ом, причем размыкатель автоматически срабатывал от сигнала разбаланса мостовой схемы.

После перевода холодильной установки преимущественно в рефрижераторный режим работы (за исключением жидкого гелия, подававшегося на охлаждение тоководов) перепад давлений в СМС возрос до 0,3 кг/см² (давление входа 0,7 кг/см², давление выхода 0,4 кг/см²), что соответствовало увеличению расхода хладагента в 1,5—2 раза. В этом режиме СМС оказалась способной выдержать скачкообразные возмущения до более высоких токов. Опытным путем напряжение скачков, при котором происходило срабатывание схемы защиты, было по-

добрано равным 5 В при длительности его существования $> 0,2$ с. Эти значения связаны с параметрами реально наблюдавшихся скачков, амплитуда которых достигала нескольких вольт, а длительность 0,1—0,2 с.

По программе испытаний в СМС был введен ток 4500 А, соответствующий значению рабочего поля, при котором предполагается использование Т-7 в плазменных экспериментах. Программа работ с Т-7 предусматривала подъем тока в диапазоне 4,5—6 кА только после выполнения на установке основного объема плазменных экспериментов. Однако успешное достижение рабочего тока с первого раза и без перехода в нормальное состояние способствовало принятию решения о дальнейшем подъеме тока до 4800 А. Этот ток, составляющий 70% критического тока шины при 4,2 К, был также достигнут без перехода СМС в нормальное состояние.

Достигнутый ток (4800 А) соответствует полю на оси тора 2,4 Т, максимальному полю на обмотке 4 Т и запасенной энергии ~ 12 МДж. Общее время его ввода (включая остановки) составило ~ 5 ч. Вывод тока из СМС продолжался ~ 20 мин и также сопровождался интенсивными скачками. Объяснить такие скачки появлением активного сопротивления вряд ли можно, так как это соответствовало бы выделению энергии ~ 1 кДж. Такой энергии достаточно для полного испарения гелия в каналах одной галеты. Поэтому трудно предположить, чтобы после такого скачка активного сопротивления могло бы восстановиться сверхпроводящее состояние. Вероятно, наблюдавшиеся скачки имели в основном индуктивный характер и были связаны, например, со скачкообразным смещением одной или нескольких галет к оси тора на расстояние порядка долей миллиметра. Весьма важно отметить, что достигнутый ток и тем более поле на обмотке выше тока и поля перехода в нормальное состояние отдельных секций при их предварительных испытаниях, несмотря на гораздо более высокую скорость гелия в каналах в этих испытаниях (испытания «восьмушек» обеспечивались рефрижератором мощностью ~ 600 Вт, причем соответствующий расход гелия приходился только на 1/8 всей СМС). Таким образом, предположение о диамагнитных причинах преждевременного перехода периферийных галет в нормальное состояние получило убедительное подтверждение.

Существенно, что при вводе тока наибольшее число и частота появления скачков наблюдались в диапазоне 1,5—3 кА. При более высоких токах скачки стали реже и амплитуда их уменьшилась почти на порядок. Повторный ввод тока с прежней средней скоростью, а также его более быстрый вывод (примерно за 20 мин) сопровождался скачками приблизительно в том же количестве и в тех же диапазонах тока. По-видимому, такое поведение системы можно объяснить некоторой «свободой» каркаса СМС из-за недостаточно сильного обжатия мягкой изоляции галет при их стяжке болтами.

Способность СМС выдерживать такие сильные возмущения дает основание надеяться, что и возмущения от полоидального поля, ослабленные азотным криогенно-электромагнитным экраном, не приведут к необходимости значительного снижения допустимого рабочего тока СМС. В настоящее время ведется подготовка установки Т-7 к плазменным экспериментам.

Выводы. Проведенные испытания подтвердили работоспособность СМС установки Т-7 и правильность основных конструктивных и схемных решений, принятых на основе предварительных исследований. В частности, продемонстрирована возможность параллельного гидравлического соединения многочисленных секций без дополнительного регулирования. Вполне эффективным оказалось также охлаждение СМС жидким двухфазным гелием, а не «сверхкритическим» холодным гелием, часто обсуждающимся в литературе.

Авторы выражают глубокую признательность дружному коллективу инженеров, конструкторов, техников и рабочих, с энтузиазмом вложивших много сил в сооружение установки Токамак-7 и проведение испытаний.

Поступила в Редакцию 3. VII. 78

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черноплеков Н. А. Сверхпроводящие магнитные системы для исследований по физике плазмы в СССР. Докл. на VI Междунар. конф. по магнитной технологии. Братислава, 29 авг.—2 сент. 1977.
2. Conceptual Design and Qualifying Test of Superconducting Tokamak: Topus II "Supra", 1977.
3. Keilin V. E. In: Proc. of ICEC-5. Kyoto. JPC Sci. and Techn. Press, 1974. p. 413.
4. Ivanov D. P. "IEEE Trans. on Magnetics", 1977, Mag-13, N 1, p. 694.