

УДК 537.626:538.945

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ 22-ПОЛЮСНЫЙ ВИГГЛЕР С ПОЛЕМ 7 Тл ДЛЯ НАКОПИТЕЛЯ DELTA

© 2019 г. А. В. Брагин¹, С. С. Васичев¹, А. А. Волков¹, Е. А. Гусев¹, А. И. Ерохин¹,
А. В. Зорин¹, В. Х. Лев¹, Н. А. Мезенцев¹, А. Н. Сафронов¹, О. А. Тарасенко¹,
Ш. Хан², С. В. Хрушев¹, В. М. Цуканов¹, В. А. Шкаруба¹, *

¹Институт Ядерной Физики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Технический университет, Дортмунд, Германия

*E-mail: shkaruba@mail.ru

На ускорителе электронов DELTA (Дортмунд, Германия), источнике синхротронного излучения с энергией 1.5 ГэВ, возникла необходимость в установке сверхпроводящего вигглера в качестве вставного устройства для генерации излучения с энергией фотонов вплоть до 30 кэВ одновременно для трех каналов вывода излучения. Боковые каналы вывода отделены углом 15 мрад относительно оси центрального канала и каждый из них использует горизонтальную апертуру 5 мрад. Вставное устройство, удовлетворяющее этим требованиям, должно иметь период 127 мм и магнитное поле 7 Тл при вертикальной апертуре для пучка 10 мм и расстоянии от фланца до фланца 2.2 м. В статье описан сверхпроводящий 22-полюсный вигглер с полем 7 Тл и периодом 127 мм, работающий с нулевым расходом жидкого гелия. В статье представлены концепция и основные особенности конструкции магнитной и криогенной систем, а также основные параметры и результаты испытаний нового сверхпроводящего вигглера с полем 7 Тл для источника синхротронного излучения DELTA.

DOI: 10.1134/S0367676519020054

ВВЕДЕНИЕ

На источнике синхротронного излучения DELTA (Дортмунд, Германия) с энергией электронов 1.5 ГэВ с 2002 г. используется в качестве одного из вставных устройств сверхпроводящий 5-полюсный ассиметричный вигглер с полем 5.3 Тл [1]. В этом вигглере используется режим замороженного тока для минимизации расхода жидкого гелия. Поток фотонов на критической энергии 7.9 кэВ составляет $2.16 \cdot 10^{13}$ фотон \cdot с⁻¹ \cdot мрад⁻¹ \cdot 0.1% BW. Излучение вигглера обеспечивает работу одновременно трех каналов в жесткой области спектра вплоть до 30 кэВ. Для дальнейшего развития экспериментов с СИ появилось требование заменить данный вигглер на новое вставное устройство для генерации максимально возможного потока фотонов в жесткой области спектра до 30 кэВ. При этом предполагалось использовать существующую геометрию всех трех каналов вывода излучения.

Новый вигглер представляет собой многополюсный электромагнит со знакопеременным магнитным полем, состоящий из двух половинок, размещенных выше и ниже вакуумной камеры электронного пучка. Магнит помещен в специальный криостат с жидким гелием, охлаждаемый криокулерами и работающий без испарения жидкого гелия в течение не менее 1 года. Общий вид сверхпроводящего вигглера представлен на

рис. 1. Основные параметры описываемого вигглера представлены в табл. 1.

МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Минимальная допустимая вертикальная апертура, исходя из требований динамики электронного пучка, составляет 10 мм. Это позволило разместить внутри магнитного зазора холодную камеру

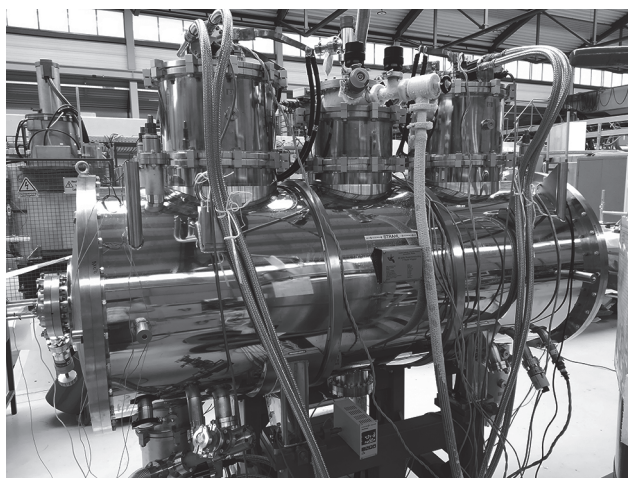


Рис. 1. Общий вид 22-полюсного сверхпроводящего вигглера с полем 7 Тл для накопителя DELTA.

Таблица 1. Основные параметры 22-полюсного сверхпроводящего вигглера с полем 7 Тл для накопителя DELTA

Магнитное поле рабочее (макс.), Тл	7.0 (7.25)
Число пар основных полюсов	18
Число пар полюсов с полем 1/4	2
Число пар полюсов с полем 3/4	2
Последовательность полюсов	1/4, -3/4, 1, -1, 1... -1, 3/4, -1/4
Период, мм	128
Магнитный зазор, мм	16.5
Вертикальная апертура, мм	10
Горизонтальная апертура, мм	90/110
Магнитная длина	~1500
Расстояние от фланца до фланца, мм	2200
Критическая энергия, кэВ	10.5
Коэффициент ондуляторности	~83
Мощность излучения ($E = 1.5$ ГэВ, $I = 0.1$ А), кВт	~13
Токи в обмотках (внутр./наружн. секция)	~180/(180 + 225)
Накопленная энергия, кДж	~250
Потери гелия при срыве, л	<50
Потребление гелия, л · ч ⁻¹	0, (абс. давление 0.2 бар)
Время подъема поля, мин	~10

из нержавеющей стали, которая одновременно является стенкой гелиевого сосуда, а также медную камеру для защиты жидкого гелия от нагрева со стороны электронного пучка. При уменьшении толщины медной и нержавеющей камер, а также зазоров между ними до технологического предела, минимально допустимое значение межполюсного магнитного зазора составило 16.5 мм. Также принимались во внимание конкретные парамет-

ры сверхпроводящего провода из Nb-Ti диаметром 0.89 мм с критическим током не более 360 А в магнитном поле 7 Тл, который предполагается использовать для изготовления сверхпроводящей обмотки. Длина доступного промежутка для установки нового вигглера составляет 2.2 м. Результаты оптимизации магнитной структуры показали, что при выполнении вышеперечисленных условий максимальный поток фотонов будет генерироваться при значении магнитного поля на орбите 7 Тл и периоде структуры 127 мм. Это позволило разместить на доступной длине прямолинейного промежутка 18 основных полюсов, а также две пары полюсов с полем 1/4 и 3/4 от величины основного поля для компенсации орбиты. Таким образом, были сформулированы требования к магнитной структуре нового вигглера в виде 22 пар полюсов с полем 7 Тл, периодом 127 мм и вертикальной апертурой 10 мм. На рис. 2 представлен спектральный поток излучения из данного вигглера для различных энергий фотонов при токе пучка 0.1 А и энергии 1.5 ГэВ.

Основным элементом магнитной структуры является центральный полюс, создающий магнитное поле 7 Тл на орбите пучка. Обмотка центрального полюса состоит из двух секций, намотанных на сердечник из стали АРМКО. Секционирование обмоток позволяет увеличивать уровень поля примерно на 15% за счет возможности добавления тока на наружную секцию, где уровень магнитного поля ниже. В результате оптимизации геометрии обмотки для получения максимальной величины маг-

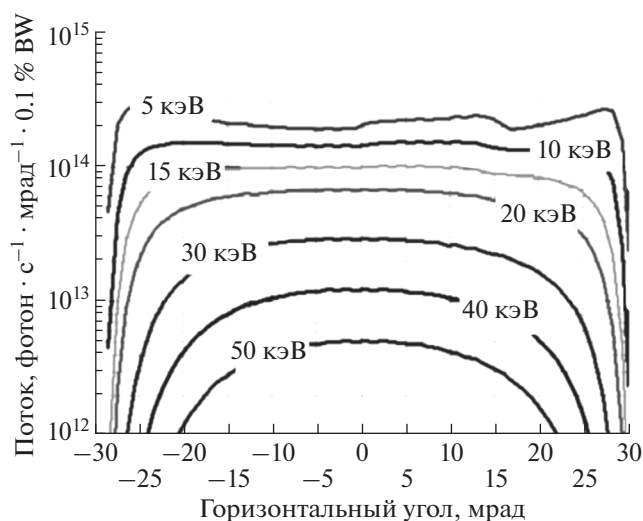


Рис. 2. Спектральный поток синхротронного излучения вигглера DELTA для различных энергий фотонов (ток $I = 0.1$ А, энергия $E = 1.5$ ГэВ).

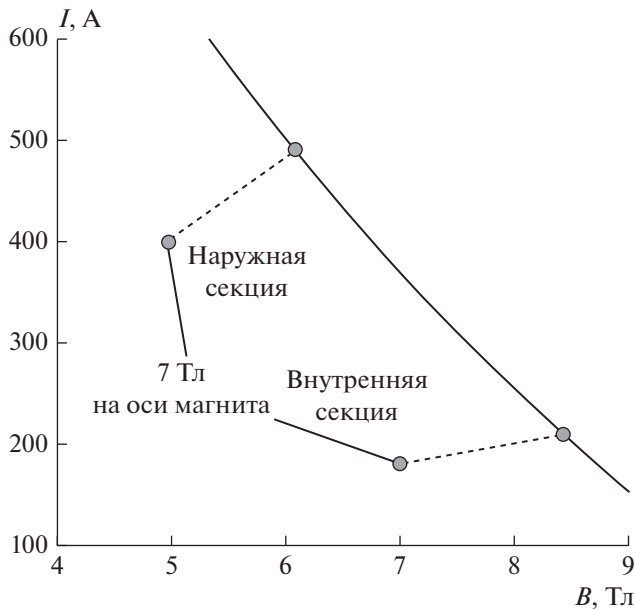


Рис. 3. Расположение рабочих точек, характеризующих состояние сверхпроводящего провода в обмотках, для внутренней и наружной секций относительно критической кривой сверхпроводящего провода.

был выбран 140 мм, что обеспечило требуемую поперечную однородность поля не хуже, чем 0.2% на участке ± 20 мм для минимизации секступольной компоненты магнитного поля. При этом принималось во внимание то, что критический уровень магнитного поля, ограничивающий максимальный ток в обмотках, находится на радиусном участке первого слоя каждой из секций. На рис. 3 представлено расположение рабочих точек на оптимизированных внутренней и наружной секциях обмотки центрального полюса относительно критической нагрузочной кривой использованного сверхпроводящего провода.

Кроме того, использование секционирования обмоток позволяет занулять интегралы магнитного поля вдоль оси вигглера для замыкания орбиты пучка. Ток первого источника питания величиной ~ 180 А запитывает последовательно соединенные внутренние и наружные секции всех 18 пар центральных полюсов, а также боковые полюсы с полем $1/4$. Второй же источник питания добавляет ток ~ 225 А только на наружные секции, величина магнитного поля на которых имеет меньшее значение, а также запитывает боковые полюсы с полем $3/4$. Таким образом, суммарный ток на наружных секциях составляет ~ 405 А. Перераспределяя токи между обоими источниками, можно управлять величиной интегралов магнитного поля вигглера. Схема питания обмоток представлена на рис. 4.

Для защиты обмоток вигглера во время срыва сверхпроводимости была использована пассив-

нитного поля толщина первой и второй секций составила 12 слоев, а длина слоя составила 40 витков. Железный сердечник имеет форму рэйстрекса с двумя плоскими участками и двумя полуокружностями. Оптимальная толщина сердечника составила 24 мм. Поперечный размер сердечника

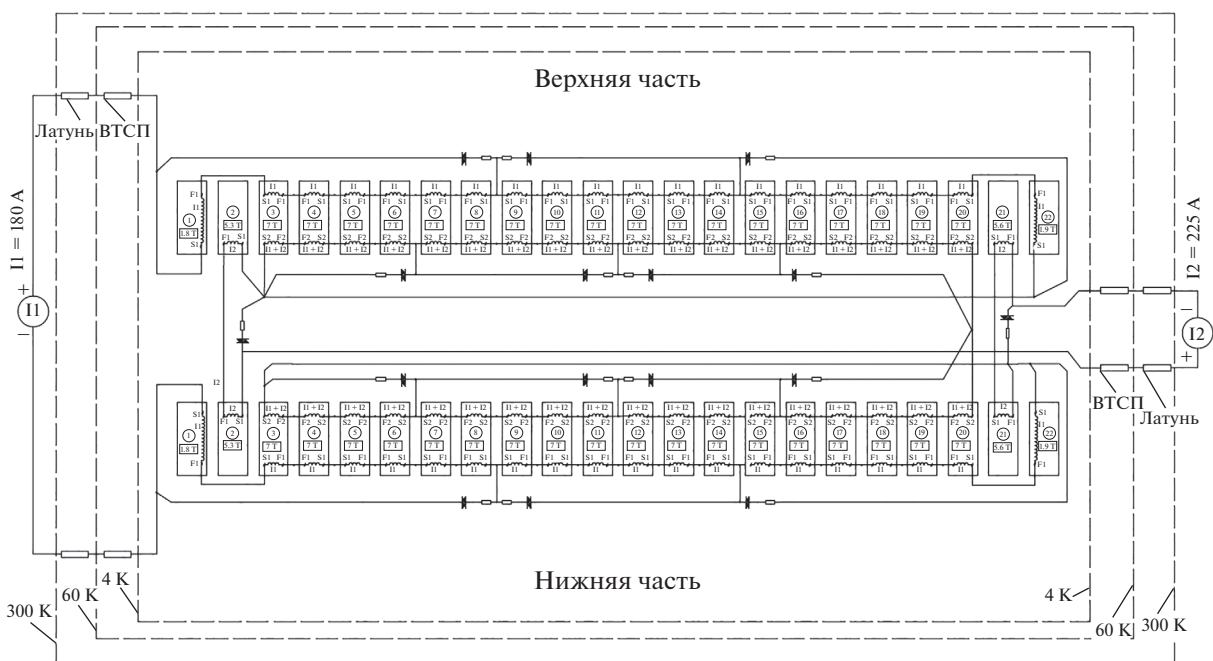


Рис. 4. Схема подключения обмоток и система защиты вигглера DELTA.

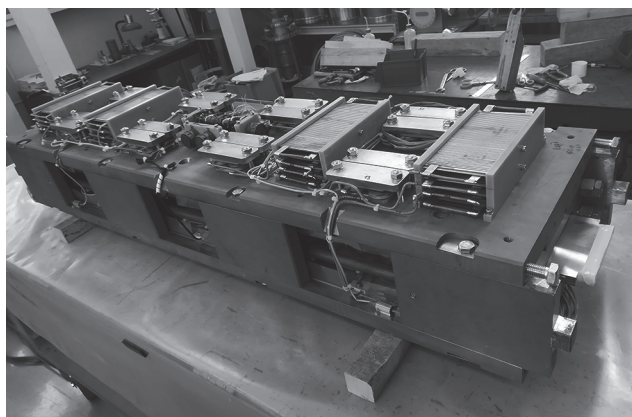


Рис. 5. Общий вид сверхпроводящего магнита и системы защиты вигглера DELTA.

ная защита с помощью цепочек последовательно соединенных диодов и защитных резисторов, установленных параллельно обмоткам вигглера. Каждая цепочка защищает несколько последовательно соединенных обмоток с безопасной накопленной энергией, не превышающей ~ 30 кДж. Максимальное напряжение на обмотках при срыве не превышало безопасных ~ 150 В. При этом длительность затухания токов в обмотках составила ~ 0.8 секунды. Напряжения, возникающие на защитных резисторах, используются в качестве сигнала для срабатывания детектора срыва сверхпроводимости, отключающего источники питания. Это позволяет повысить устойчивость детектора срыва к ложным срабатываниям, так как сигнал с резисторов появляется только после появления напряжения от нормальной зоны на обмотке, которое приводит к открыванию диодов. Общий вид собранного сверхпроводящего магнита и системы защиты представлен на рис. 5.

КРИОГЕННАЯ СИСТЕМА

Концепция криогенной системы вигглера основана на предотвращении испарения гелия в криостате путем последовательного перехвата теплопритоков в сосуд с жидким гелием на соответствующие ступени криокулеров с температурами 60, 20 и 4 К [2]. Это позволило не только получить нулевой расход жидкого гелия, но и перохладить гелий до температуры ~ 3 К и достигнуть пониженного давления в гелиевом сосуде относительно наружной атмосферы. Конструкция криостата представлена на рис. 6.

Сверхпроводящий магнит заключен в гелиевый сосуд, который окружен двумя медными экранами, охлаждаемыми ступенями криокулеров с температурами 60 и 20 К. Приток тепла через излучение на гелиевый сосуд не превышает 0.2 мВт. Гелиевый сосуд подвешен к наружному

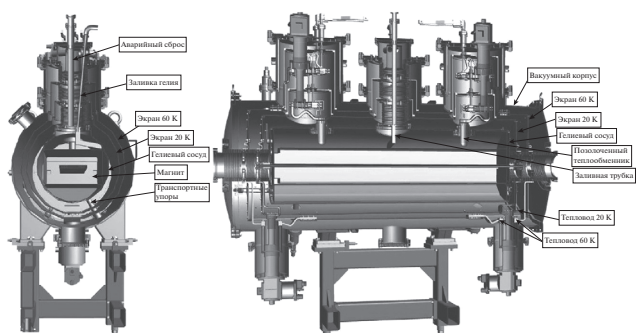


Рис. 6. Конструкция криостата вигглера DELTA с нулевым расходом гелия.

корпусу с помощью тонких лент из кевлара, имеющего очень низкую теплопроводность и высокую механическую прочность, благодаря чему приток тепла в гелий через растяжки не превышает 10 мВт. Гелиевый сосуд связан с наружной атмосферой через центральную горловину, через которую также осуществляется заливка жидкого и сброс газообразного гелия и вывод диагностических проводов. Гибкие медные теплопроводы перехватывают и отводят потоки тепла во всех критических точках криостата на головки четырех криокулеров фирмы Sumitomo: двух SRDK-415D с температурами 4 и 60 К и двух SRDK-408S2 с температурами 20 и 60 К. При этом все четыре ступени криокулеров с температурой 60 К и общей мощностью ~ 180 Вт используются для охлаждения самого нагруженного внешнего теплового экрана.

Криокулеры SRDK-415D также являются основой двух узлов ввода тока, состоящих из последовательно соединенных наружных латунных токовводов и внутренних токовводов из высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП), которые постоянно соединены с обмотками магнита через герметичные разъемы с керамическими изоляторами. При этом ступени криокулеров с температурой 60 К используются для перехвата тепла, поступающего снаружи по латунным токовводам, и тепла, выделяющегося при протекании суммарного тока ~ 300 А в каждом. Ступени криокулеров с температурой 4 К и мощностью по 1.5 Вт каждая перехватывают оставшееся тепло от ВТСП-токовводов, а также охлаждают жидкий гелий в сосуде с помощью специального позолоченного медного теплообменника. Расчетный приток тепла в гелий по всем токовводам не превышает 0.3 Вт без тока, а включение тока добавляет теплоприток не более 0.3 Вт. Температура на верхних концах ВТСП-токовводов не превышает безопасных ~ 50 К при протекании максимального тока и опускается до ~ 35 К при выключении тока.

В межполюсный зазор магнита вставлена вакуумная камера из нержавеющей стали для пролета пучка, являющаяся одновременно стенкой гелиевого сосуда, а также медная камера, называемая лайнер. Лайнер используется для защиты объема с жидким гелием от нагрева пучком синхротронного излучения и токами изображения, наводимыми электронным пучком накопителя. Ступени криокулеров SRDK-408S2 с температурой 20 К используются для перехвата тепла с лайнера. Расчетный теплоприток в гелий через медный лайнер не превышает 0.2 Вт. Высокий уровень магнитного поля 7 Тл при низкой энергии 1.5 ГэВ приводит к значительному горизонтальному отклонению орбиты электронного пучка от оси вигглера. Поэтому поперечный размер медного лайнера составил 90 мм, а выход лайнера был сделан в виде расходящегося конуса до размера 110 мм, чтобы предотвратить касание стенок лайнера синхротронным излучением. На рис. 7 представлено распределение мощности излучения по горизонтальному углу на различных расстояниях от магнита.

Защитный вакуум криостата отделен от сверхвысоковакуумной камеры для пролета пучка сильфонными узлами. Плавный переход между лайнером и камерой накопителя обеспечивается радиочастотными адаптерами со скользящими пружинными контактами, которые одновременно

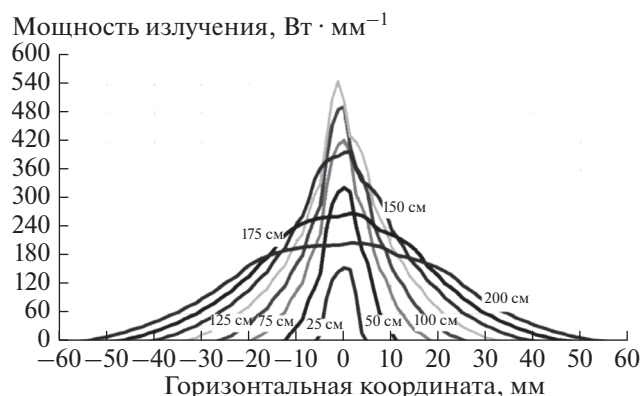


Рис. 7. Горизонтальное распределение мощности излучения вигглера DELTA для поля 7.2 Тл на расстоянии от 25 до 200 см от начала магнита (ток $I = 0.1$ А, энергия $E = 1.5$ ГэВ).

но используются и для компенсации теплового сжатия лайнера при охлаждении.

Общий расчетный баланс теплопритоков в криостат представлен в табл. 2, из которой видно, что холодильная мощность криокулеров на всех ступенях превышает соответствующие притоки тепла, что не только значительно повышает надежность криогенной системы, но и увеличивает ресурс работы криокулеров. Можно отметить, что общая холодильная мощность ступеней 4 К пре-

Таблица 2. Баланс теплопритоков в криостат сверхпроводящего вигглера с нулевым расходом гелия

	Наружный экран (60 К), Вт	Внутренний экран (20 К), Вт	Гелиевый сосуд (4 К), Вт
Тепловое излучение	8	0.05	0.0002
Центральная горловина	2.5	0.3	0.06
Сильфоны вакуумной камеры	5.3	0.25	0.04
Система подвесок	0.5	0.1	0.01
Токовводы (теплопроводность)	50	0	0.3
Нагрев токовводов током	50	0	0.3
Измерительные провода	5	0.1	0.01
Лайнер	10	10	0.2
Общий приток	131.3	10.8	0.92
Охлаждающая мощность криокулеров	180 (при 50 К)	15 (при 20 К)	3 (при 4.2 К)

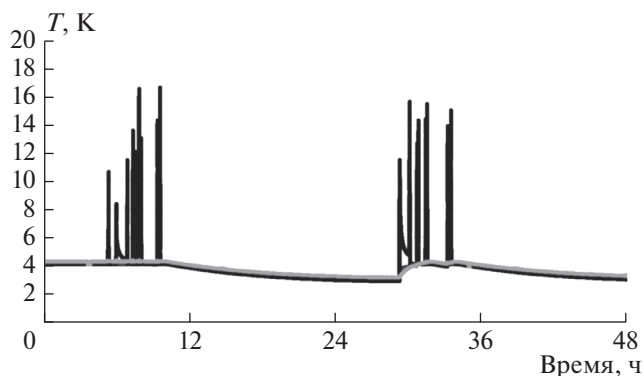


Рис. 8. Поведение температуры сверхпроводящего магнита вигглера DELTA при срыве сверхпроводимости.

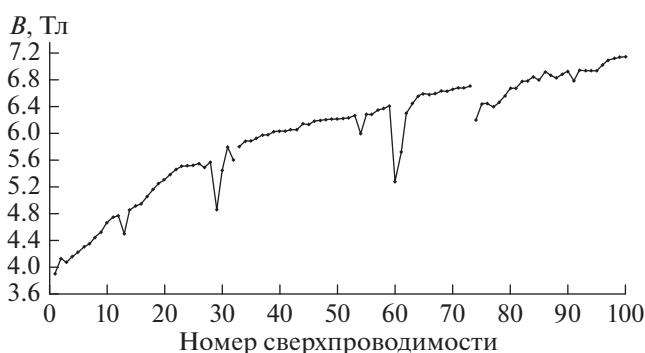


Рис. 9. Процесс тренировки сверхпроводящего магнита DELTA.

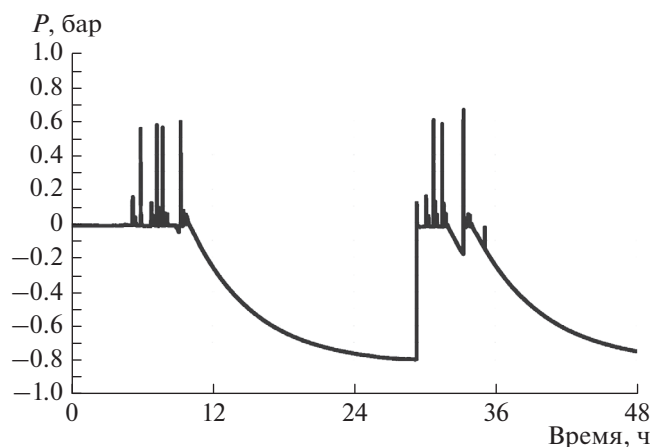


Рис. 10. Поведение давления в гелиевом сосуде вигглера DELTA при срыве сверхпроводимости.

вышает тепловыделение в ~ 3 раза, и избыточная мощность идет соответственно на переохлаждение гелиевого сосуда с магнитом внутри до ~ 3 К и понижение абсолютного давления в сосуде до ~ 0.2 бар. Это дает возможность повысить уровень магнитного поля за счет улучшения токовых ха-

рактеристик сверхпроводника и повысить надежность работы вигглера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Особенностью конструкции данного криостата является то, что для предотвращения больших потерь гелия при срыве сверхпроводимости объем жидкого гелия в сосуде с магнитом не превышает 50 л. При этом значение запасенной в магните энергии составляет ~ 250 кДж, что соответствует испарению ~ 100 л жидкого гелия. Поэтому оставшаяся часть запасенной энергии идет на нагревание магнита в процессе срыва до безопасной температуры ~ 17 К, как показано на рис. 8. В процессе изготовления данного магнита было проведено несколько циклов отогрева и последующей тренировки на предмет получения максимального магнитного поля, в процессе которых было произведено около 100 срывов сверхпроводимости. При этом был достигнут максимальный уровень поля 7.15 Тл. Процесс тренировки магнита представлен на Рис. 9. Можно предположить, что причиной такого большого числа срывов в данном магните является большое число сверхпроводящих обмоток в количестве 36 штук на каждой из которых срыв наблюдался несколько раз. Можно заметить, что при каждом последующем цикле непрерывной тренировки магнит выходил на максимальные уровень поля уже после меньшего числа срывов.

Благодаря высокой эффективности охлаждения температура внутри гелиевого сосуда с магнитом понижалась до ~ 2.9 К, что соответствует понижению давления до -0.8 бар относительно наружной атмосферы. Как видно из рис. 10, при срыве давление повышалось до 0.6 бар, а затем вновь спадало до первоначальных значений менее чем за 20 ч. На рис. 11 представлено типичное распределение температур в различных точках криостата в рабочем состоянии при уровне магнитного поля 7 Тл.

Соотношение токов в обмотках, соответствующее минимальному отклонению орбиты пучка на всех уровнях магнитного поля в вигглере было получено при помощи метода натянутой проволоочки с током [3]. В процессе подъема и опускания магнитного поля вигглера в течение ~ 10 мин значения первого и второго интегралов в области полей от 2 до 7 Тл не превышали $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ Тл \cdot м и $\pm 2.5 \cdot 10^{-4}$ Тл \cdot м² соответственно. Для запитки обмоток вигглера были использованы источники тока, созданные в ИЯФ СО РАН специально для работы на чисто индуктивную нагрузку, которые обеспечивают долговременную стабильность поля не хуже, чем $\pm 2.3 \cdot 10^{-5}$ в течение нескольких суток.

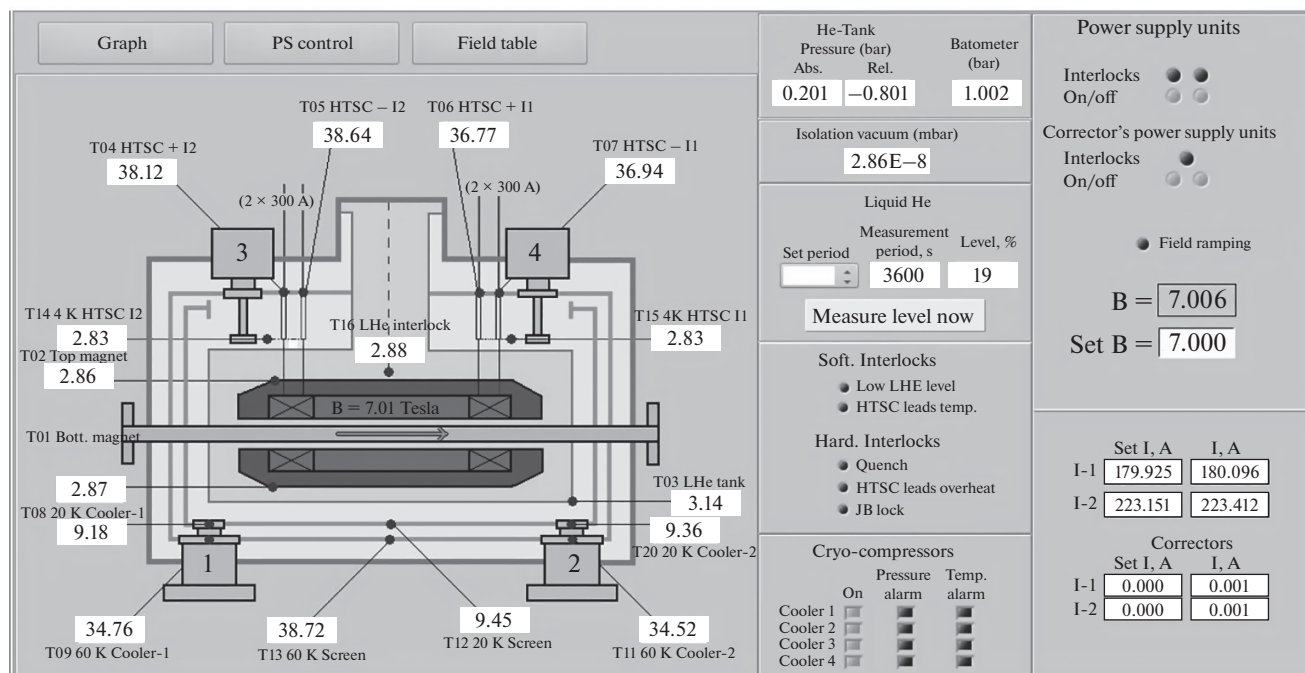


Рис. 11. Распределение температур в различных точках криостата DELTA в рабочем состоянии при уровне магнитного поля 7 Тл (копия экрана программы управления).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В июне 2018 были проведены успешные предварительные испытания нового вигглера для синхротрона DELTA. Была продемонстрирована надежная работа и получены требуемые параметры магнитной и криогенной систем, а также системы управления. В ближайшее время ожидается перевозка вигглера на источник синхротронного излучения DELTA для установки и запуска всех систем вигглера непосредственно на накопителе.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП “СЦСТИ” на базе ВЭПП-3/ВЭПП-4М/

НЛСЭ ИЯФ СО РАН, поддержанного Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI62117X0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schirmer D. et al. // EPAC-2000. Vienna. Austria. P. 2337.
2. Khrushchev S., Mezentsev N., Lev V. et al. // Proc. IPAC 2014. Dresden. Germany. P. 4103.
3. Mezentsev N., Tsukanov V., Zorin A. // Phys. Proc. 2016. V. 84. P. 67.