

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТНЫЕ СИСТЕМЫ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ И ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТРАНСПОРТНОГО ТОКА

Юферов В.Б., д.т.н.

Национальный технический университет "ХПИ"

Украина, 61002, г. Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", филиал кафедры электрофизики при ННЦ ХФТИ

Друй О.С., Скибенко Е.И., к.ф.-м.н., Холод Ю.В., Черный О.В., к.ф.-м.н., Ильичева В.О., Муфель Е.В., Рыбалко А.Н.

Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт

Украина, 61108, г. Харьков, ул. Академическая 1, ННЦ ХФТИ,

тел. +38-0572-356326, E-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Описані основні технологічні проблеми при створенні надпровідної термоядерної установки стеллараторного типу. Надані експериментальні залежності величин критичних струмів короткого і довгого зразків з різними умовами замоноличення й охолодження; залежності нагрівання соленоїдів від швидкості виведення запасеної в них енергії. Описано особливості виготовлення й експлуатації. Розглянуто один з типів магнітних сепараторів з надпровідною обмоткою і величиною $B\sqrt{V} = 500$ Тл/м².

Описаны основные технологические проблемы при создании сверхпроводящей термоядерной установки стеллараторного типа. Приведены экспериментальные зависимости величин критических токов короткого и длинных образцов с различными условиями замоноличивания и охлаждения; зависимости нагрева соленоидов от скорости выведения запасенной в них энергии. Описаны особенности изготовления и эксплуатации. Рассмотрен один из типов магнитных сепараторов со сверхпроводящей обмоткой и величиной произведения $B\sqrt{V} = 500$ Тл/м².

ВВЕДЕНИЕ

С начала исследований по управляемому термоядерному синтезу (УТС) создание термоядерного реактора, (ТЯР), было сориентировано на два типа магнитных ловушек – открытого и замкнутого типов. По ряду причин наибольшее внимание было уделено системам замкнутого, тороидального типа, которые можно разделить на два класса: стеллараторов и токамаков. В первом случае конфигурация магнитных полей, удерживающих плазму, создается с помощью внешних токонесущих обмоток, с достаточно сложной формой, что позволяет создать на этой базе стационарный термоядерный реактор. Во втором случае, к комбинации внешних, достаточно простых тороидальных обмоток, добавляется еще и ток по плазме, создающий необходимое для удержания плазмы вращательное преобразование магнитных силовых линий. Именно наличие тока в плазме делает систему токамака – квазистационарной и не в полной мере приемлемой в качестве стационарного ТЯР. Благодаря И.В. Курчатову, в начале 60-х годов ХФТИ становится мировым стеллараторным термоядерным центром.

Предполагалось, что в дальнейшем эта работа перерастет в разработку термоядерного реактора стеллараторного типа. На заре исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС), как уже говорилось выше, концепция магнитного удержания плазмы являлась основной и достижение цели – поджига реакции, связывалось с необходимостью получения высоких магнитных полей (не менее 2,5 Тл – в реакторе Тамма – Сахарова), сверхвысокого вакуума, откачки гелия, водорода и газов-примесей, плотных газовых и паровых мишеней в вакууме, мощных ионных пучков, высокопоточных разрядов. Каждая из этих задач актуальна и теперь, а в те времена

являлась настоящей научно-технической проблемой. Следует заметить, что именно ХФТИ в те годы располагал научной базой для решения этих проблем, поэтому этим и объяснялся выбор И.В. Курчатова.

ПАРАМЕТРЫ СВЕРХПРОВОДЯЩЕЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Не вдаваясь в подробности довольно сложных проблем удержания плазмы в замкнутых магнитных ловушках стеллараторного типа, где пока еще не в полной мере, могут быть связаны параметры магнитной системы с параметрами удерживаемой плазмы, заметим, что основной параметр – энергетическое время жизни ионов плазмы τ_{Ei} может быть определено как:

$$\tau_{Ei} = C \cdot a_0^2 \cdot B_0^2 \cdot R \cdot t_\Sigma$$

где показатели степени для малого радиуса тора и плазмы, a_0 и величины магнитного поля, B , как правило, равны -2, для R – большого радиуса тора и угла вращательного преобразования, t_Σ , близки или равны -1. Естественно, что магнитная система ТЯР с положительным энергетическим выходом, полем более 2.5 Тл, объемом более 10^2 м³ и стационарным режимом работы может быть только гиперпроводящей или сверхпроводящей, поэтому с самого начала проводились углубленные работы по криомагнитным технологиям, обеспечивающим возможность создания гиперпроводящих и сверхпроводящих систем с высоким уровнем магнитных полей [1÷6].

Начальные параметры замкнутой сверхпроводящей магнитной ловушки стеллараторного типа, системы в которой должна была удерживаться плазма, предлагались достаточно внушительными, хотя и находились на уровне уже достигнутых в тепловых системах, например, на установке ХФТИ – "Ураган" - 2 [21]. Дополнительным, ранее не исследованным элементом,

должен был явиться распределенный по длине тора дивертор – устройство для удаления примесей из удерживаемой плазмы, т.е. была выбрана магнитная система типа торсотрон без обмотки продольного поля [7] см Рис. 1. На рисунке представлен радиальный разрез тороидальной магнитной системы с одновременным разрезом камер дивертора, в которых должны поглощаться частицы плазмы. Ось тора находится слева от разреза. Как известно, магнитная система такого типа обладает тремя классами магнитных поверхностей, характеризующихся различным поведением магнитных силовых линий. Силовые линии первого типа замыкнуты вокруг каждой токнесущей обмотки. Силовые линии второго типа – обобщенные- замыкаются сами на себя после большого числа оборотов. Они находятся внутри сепаратрисы, на них удерживается плазма. К третьему классу относятся обобщенные силовые линии, выходящие из внутренней области тора-ловушки наружу, после нескольких оборотов внутри тора. По ним выходит диффундирующая из ловушки, так называемая диверторная плазма.

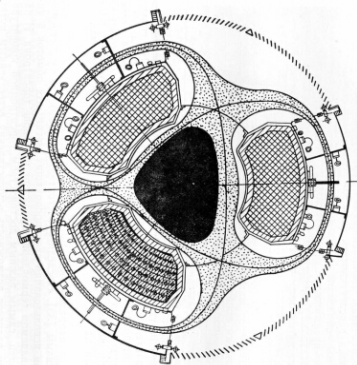


Рис. 1. Радиальный разрез тороидальной системы торсотрона с камерами откачки дивертора. 1- винтовые обмотки на торе. 2- область замкнутых – ловушечных силовых линий с удерживаемой плазмой. 3- область диверторных силовых линий

Параметры плазмы и параметры системы были определены как: плотность плазмы- $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$, температура плазмы $100 \div 1000 \text{ эВ}$, время удержания- $1-10 \text{ мс}$, большой диаметр тора- $100 \div 120 \text{ см}$, малый диаметр – 20 см , величина продольного магнитного поля – 20 кЭ , угол вращательного преобразования 0.5 и шир – 0.2 . Для выполнения главного требования – распределенного по длине тора винтового дивертора была выбрана конфигурация – трехзаходного торсотрона без обмоток продольного магнитного поля. Использование трехзаходной обмотки, идущей по тору под углом около 45° , одновременно решало и проблему шира, (перекрученность силовых линий магнитного поля друг относительно друга), отсутствующего в двузаходных конфигурациях и создавало достаточный угол вращательного преобразования. Для компенсации вертикальной компоненты магнитного поля трехзаходной винтовой обмотки необходимы были компенсирующие обмотки, располагавшиеся снаружи тороидальных винтовых. Величина магнитного поля в тороидальных системах, как известно определяется соотношением:

$$B(\vartheta) = 0.2 \cdot n \cdot m \cdot I / R,$$

где n - заходность обмотки, или число токовых полюсов, m - число периодов поля, I - ток в полюсе (А). Угол вращательного преобразования и шир определяются угловой шириной полюса на торе, ϑ . и его высотой- h . Для получения оптимальных, указанных выше значений, эти величины выбраны, соответственно, как 40° и 5 см . Таким образом, было задано сечение полюса. Для данной величины магнитного поля, конструктивная плотность тока в винтовой обмотке, может быть определена по данным Рис. 2.

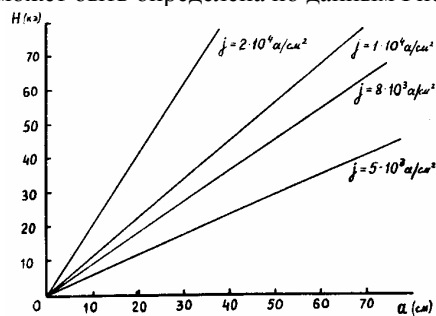


Рис. 2. Зависимость величины продольного магнитного поля от размера замкнутой магнитной системы, для данной заходности n и числа периодов поля m

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Предварительные эксперименты на моделирующей сверхпроводящей магнитной системе торсотрона "Кристалл-1", с параметрами в 2.5 раза меньшими, [8÷10] позволили определить основные задачи при создании плазменной установки "Кристалл-2". На Рис. 3 и 4 представлены схематические виды магнитных систем, позволявшие, на наш взгляд, решить конфигурационные проблемы.

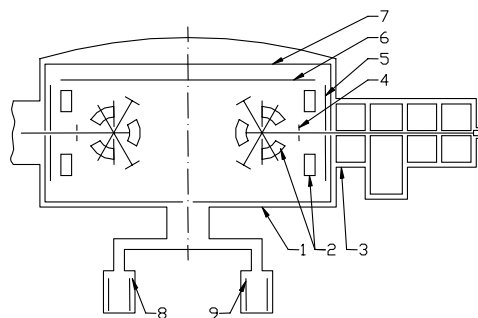


Рис. 3. Схема установки "Кристалл-2": 1 – вакуумная камера; 2 – сверхпроводящая магнитная система; 3 – инжектор быстрых нейтральных атомов; 4 – приемники плазмы; 5 – крионасос камеры, $10^{-5} \div 10^{-9} \text{ Торр}$; 6 – гелиевый насос, $10^{-5} \div 10^{-9} \text{ Торр}$; 7 – радиационный экран; 8- конденсационный насос $10 \div 10^{-5} \text{ Торр}$; 9 – криогенныйнасос $760 \div 10 \text{ Торр}$

Поскольку в этой системе должна создаваться и удерживаться горячая плазма, должны были существовать идущие по тору винтовые отверстия для входа и выхода диверторных силовых линий, ввода систем создания и измерения параметров плазмы. Поскольку обмотки должны быть сверхпроводящими, была необходима система специального криостата. Обычный криостат, в тогдашнем его понимании, создать было невозможно.

Однако продолжал существовать еще круг не решенных научно-технологических вопросов. Как обеспечить залив жидкого гелия в такие обмотки, как их экранировать от теплового излучения и плазмы? Как и чем осуществить обмотку, монопровод, кабель, шина, лента? Сверхпроводящие материалы только начинали выпускаться и не было опыта создания крупных сверхпроводящих магнитных систем. Поэтому в лабораторных условиях было налажено производство сверхпроводящего ниобий-циркониевого паяного кабеля различных конструкций, см. Рис. 5 и 6.

Эти работы проводились до освоения Ульяновским металлургическим заводом коммерческого производства многожильного ниобий-титанового кабеля.

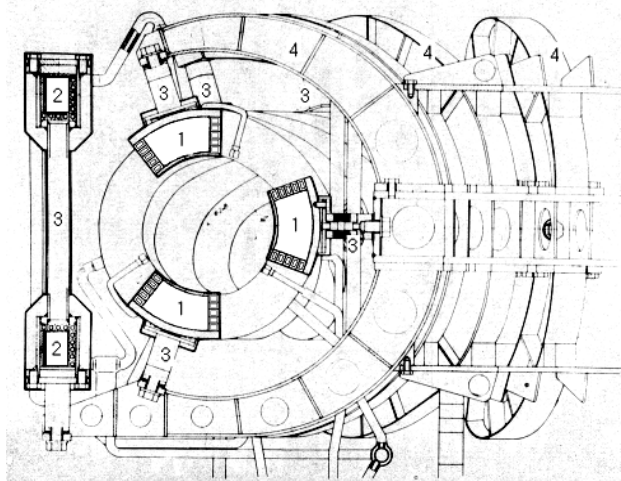
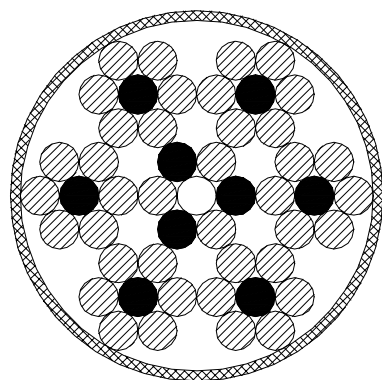


Рис. 4. Магнитная система торсатрона "Кристалл-2": 1 – винтовые обмотки; 2 – компенсирующие обмотки; 3 – силовые опоры; 4 – силовой каркас. Сверхпроводящие обмотки охлаждались протоком жидкого гелия по трубкам, представляющим собой боковые направляющие поверхности, между которыми укладывалась обмотка винтовых полюсов и компенсирующих соленоидов



● – NbZr ◐ – Cu ○ – Sn ◑ – Лавсан

Рис. 5. Поперечный разрез ниобий-циркониевого сверхпроводящего кабеля

В дальнейших работах использовался сверхпроводящий кабель НТ-50 с 30% заполнением, твистированный, 84- жильный в медной матрице, диаметром 1.5 мм, в лаковой изоляции, с токонесущей способностью 500 А при 5 Тл.

Одновременно с К-2 прорабатывалась плазменная ловушка стеллараторного типа - "Ураган-3" с использованием криогеники для ее откачки [13, 14]. Поскольку коллектив разработчиков был, в основном, один и тот же, конфигурация и параметры оказались во многом сходными. Тот же трехзаходный торсатрон без обмотки продольного поля, с распределенным винтовым дивертором и мощной системой откачки, размещенные, как и К-2, в большой вакуумной камере. У-3 имел тепловые обмотки, питаемые 100 МВт генераторами, с длительностью импульса, в несколько секунд. К-2 охлаждался жидким гелием, и поле в нем было стационарным.

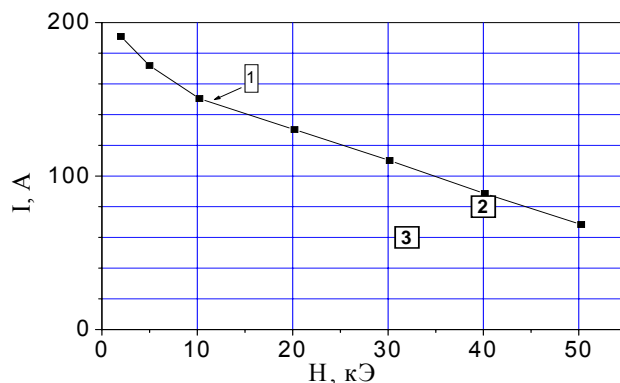


Рис. 6. Зависимость токонесущей способности сверхпроводящего кабеля от напряженности магнитного поля. 1 – короткий образец; 2 – соленоид со свободной намоткой; 3 – соленоид пропитанный парафином

Указанные выше параметры К-2 могли быть получены при выполнении ряда дополнительных требований и условий. Как указывалось, угловая ширина сверхпроводящего полюса на поперечном сечении тора не могла превышать 40° , а высота 5 см. Только при этом могли быть получены требуемые величины угла вращательного преобразования и шира при заданной величине магнитного поля. Это давало сечение полюса в 50 см^2 при конструктивной плотности тока в обмотке около $2 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ и запасенной энергии в магнитной системе на уровне 1 МДж, величине беспрецедентной для крупных магнитных систем, см. рис. 7.

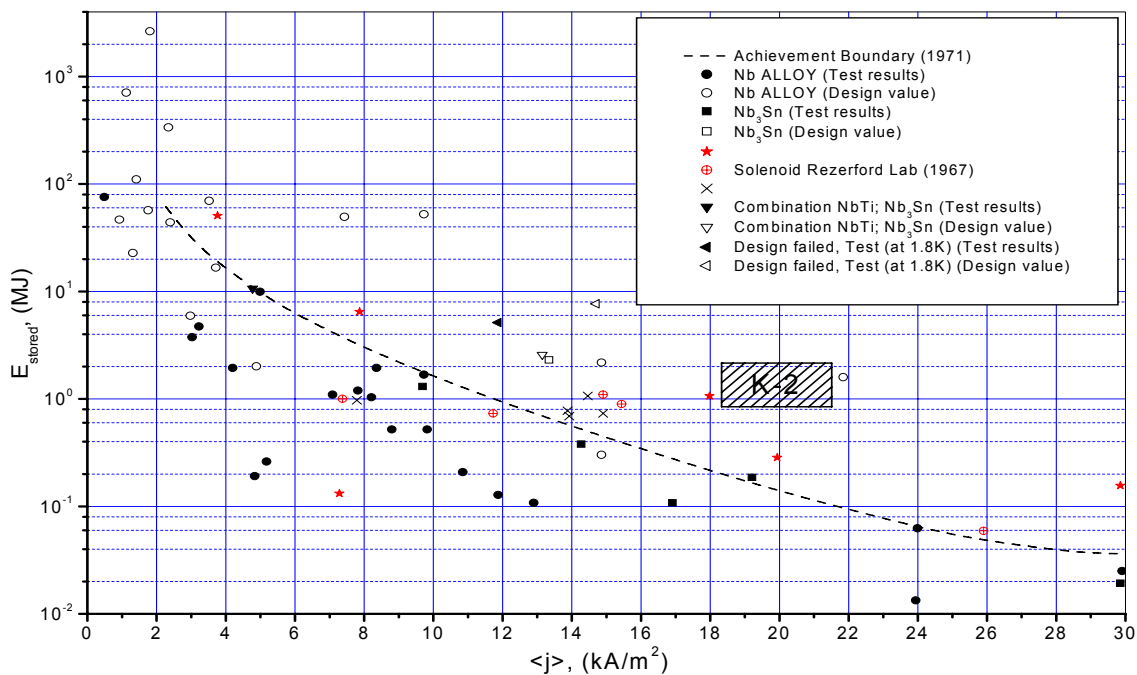


Рис. 7 Сравнительные характеристики сверхпроводящих соленоидов с данной плотностью тока и величиной запасенной энергии. Усредненная эмпирическая кривая за 1971 г.

Это исключало возможность тепловой стабилизации сверхпроводящей обмотки. Винтовая обмотка не была бессиловой, к тому же в тороидальном случае силы в каждом элементе - трехмерны, а при суммарном транспортном токе в полюсе около 1 МА их величина достигала 0.1÷1 Тонны/см, что требовало мощной силовой системы поддержки полюсов. Эта термосиловая система, в свою очередь, ставила проблемы криостатирования и криообеспечения. Трубчатые сверхпроводящие кабели, разработанные и созданные в лаборатории не позволяли получать плотность транспортного тока свыше $5 \cdot 10^3$ А/см² при 2 Тл [8], тогда как величина магнитного поля на полюсе достигала 5.5 Тл.

ЗАМОНОЛИЧИВАНИЕ И КОСВЕННОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

Существенной проблемой являлось отличие токов короткого образца от токов в длинномерных образцах и соленоидах, что исключало возможность точных расчетов и достижения заданных параметров. Поскольку имелся предварительный опыт работы с криогенными импульсными соленоидами с близкими значениями величин полей и плотностей транспортных токов, соответственно – 100 кЭ и $2 \cdot 10^4$ А/см², было целесообразно этим опытом воспользоваться. И хотя существенное различие лежало в источниках питания и теплофизике обмоток, поведение магнитных систем при разрушении представлялось идентичным. Например, разрушение криогенных соленоидов часто наблюдалось из-за нарушения межвитковой или скорее межслойной изоляции и объяснялось микродвижением витков внутри обмотки. Для предотвращения этого перемещения витков, межвитковые пустоты заполнялись клеем и изоляционным составом. На первом этапе это были клеи типа БФ, в дальнейшем - эпоксидные смолы, т.е. обмотка замоноли-

чивалась [9÷11]. В сверхпроводящих системах того времени мы в полной мере видели этот недостаток. Обмотки были рыхлыми, специальное крепление витков и слоев не использовалось, оставались каналы для протока хладагента – жидкого гелия, имелась возможность движения витков. Потому, при микроперемещениях витков должно было происходить трение между витками обмотки и, соответственно, тепловыделение. Как следствие этого тепловыделения при малых теплоемкостях обмотки при 4 К, должны были происходить локальные нагревы проводника и понижение критических характеристик СП-кабеля. Т.о. должно было наблюдаться отличие транспортного тока в длинномерных кусках от токов короткого образца. В сверхпроводящей системе, при ее замоноличивании, ограничивается движение витков и тепловыделений связанных с трением, определяющихся перемещением витков. Однако, опыта создания таких обмоток не было. Существовала еще одна проблема. Замонолитить СП-кабель в данном соленоиде - это безвозвратно потерять его для дальнейших экспериментов, а необходимо было многократно использовать один и тот же проводник в исследованиях. Поэтому первое замоноличивание сверхпроводящей обмотки было выполнено с помощью отвердевших газов, которые не имели значительной прочности, но позволяли многократно повторить процесс. Обмотка была заполнена жидким азотом и заморожена жидким гелием. Транспортный ток в ней возрос, но еще не достиг тока короткого образца, поэтому последующее замоноличивание проводилось с помощью жидкостей, поскольку их прочность в твердой фазе намного выше прочности замороженных газов. Выбирались жидкости с отрицательным коэффициентом температурного сокращения: бензин или смесь глицерина со спиртом. Транспортный ток увеличился, а при удалении межвиткового заполнителя – снижался, см. данные Таблицы 1, и Рис. 6.

Таблица 1.

Материал компаунда	I/I_0
без компаунда	0.45±0.50
жидкий азот	0.70
глицерин со спиртом	0.80±0.85
бензин или парафин	0.85–0.9
кремнийорганический лак	0.90±0.95

Итак, гелий омывал обмотки только снаружи, а в соленоидах достигался ток близкий к току короткого образца. Замоноличивание таким образом решало две проблемы: стабильное повышение тока в системе, т.е. достижение в длинномерной обмотке тока короткого образца и решало проблему криостатирования. Появлялась возможность косвенного охлаждения обмоток, создания "сухих" соленоидов, см Рис. 8. [9].

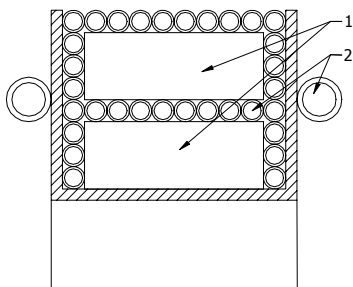


Рис. 8. Поперечный разрез обмотки "сухого" соленоида: 1 – сверхпроводник; 2 – медные трубки для протока хладагента, два варианта

Перед изготовлением магнитной системы были проведены испытания всего обмоточного кабеля, 22-х, километровых кусков, в замоноличенных жидкостью соленоидах, с целью выбора кусков для внутренних областей обмотки, с максимальными токонесящими способностями, а также проведены испытания моделирующего соленоида. Моделирующего по величине плотности транспортного тока и запасенной энергии [10]. Все эти испытания подтверждали правомочность и целесообразность разработанных технологий.

ПЕРЕХОД В НОРМАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И СКОРОСТЬ ВЫВЕДЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Однако, оставалась еще проблема не контролируемого перехода в длинных и тонких соленоидах, которыми являлась обмотка торсатрона, см. Рис. 9. Эти обмотки существенно отличаются от компактных испытательных, моделирующих соленоидов. Дело в том, что при появлении сравнительно медленно распространяющейся в продольном и поперечном направлениях нормальной фазы весь соленоид не успевает перейти в нормальное состояние. Заметим, что при выделении 1 МДж в данной магнитной системе ее средняя температура могла превышать 200 К. Поэтому при переходе в нормальное состояние только части обмотки, она могла достигнуть температуры более 300 К, а не симметричные термомеханические напряжения могли бы вывести обмотку из строя, см Рис. 9. Поэтому было решено, в случае появления нормальной фазы, пойти по пути быстрого выведения энергии из соленоидов, столь быстрого, чтобы индукционный нагрев перевел

бы всю систему в нормальное состояние. В этом случае, оставшаяся, не выведенная энергия, могла бы равномерно распределиться по обмотке и не симметричного теплового расширения не произошло бы.

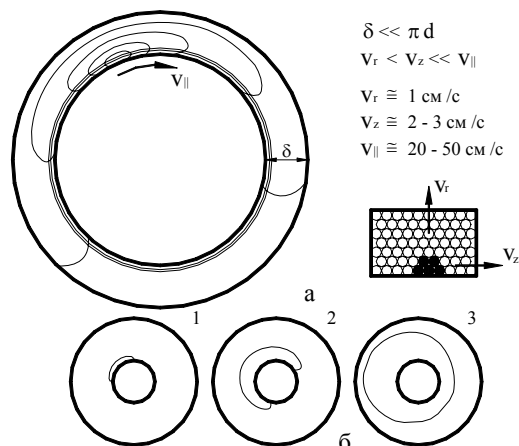


Рис. 9. Распространение нормальной зоны в длинном и тонком – а, и сосредоточенном соленоидах – б

Проведенные эксперименты на модельном соленоиде, при заданной конструктивной плотности транспортного тока и заданных материалах определили скорость такого перехода величиной около 1 Тл/с, см. Рис. 10.

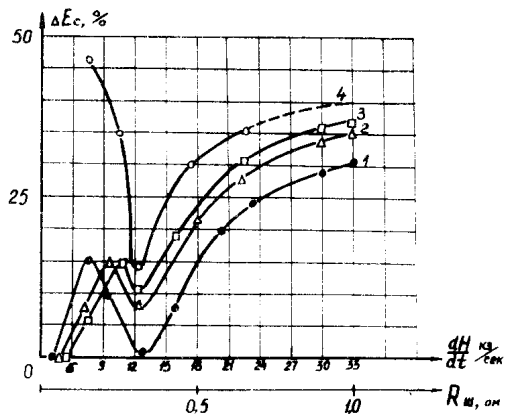


Рис. 10. Зависимость количества энергии, выделившейся в обмотке соленоида, от скорости изменения поля. 1÷30 кДж, 2÷50 кДж, 3÷75 кДж, 4÷130 кДж

При таких скоростях не только вся обмотка переходила в нормальное состояние, но, кроме того, удавалось вывести из соленоида до 80% запасенной в нем энергии [9]. Существенное повышение напряжения на соленоиде в момент такого перехода требовало хорошей изоляции обмотки от каркаса. Технологии изоляции криогенных обмоток были отработаны еще раньше, на криогенных импульсных соленоидах [3, 4], изоляция которых рассчитывалась на напряжения до 15 кВ. Кроме того, учитывая секционный характер обмоток сверхпроводящей магнитной системы, отдельные полюса и компенсирующие соленоиды – можно было разделить на секции при выведении энергии, т.е. поставить шунт на каждую обмотку. Изоляция каждой обмотки была рассчитана на 5 кВ и после изготовления, каждая из них была испытана на это напряжение.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТОРСАТРОНА

Изготовление винтовой обмотки выявило ряд технологических особенностей. Каркас и криостат винтовой обмотки формировался на силуминовой тороидальной оправке из прямоугольных медных трубок $12 \times 12 \text{ мм}^2$, с 8 мм внутренним отверстием для протока жидкого гелия, свариваемых между собой и медным листовым основанием под полюсом на тепловой контакт, см. Рис. 4. Силуминовый тор после изготовления каркаса, и сверхпроводящей обмотки, монтажа силового каркаса и силовой рамы - вытравливался химическим путем. Этапы изготовления сверхпроводящей обмотки на торе представлены на Рис. 11, 12, 13 и 14. Деформация винтовой обмотки после вытравливания составила 0.7 мм, что не вызвало существенного разрушения геометрии удерживающих силовых линий.



Рис. 11. Намоточный станок. Видны два винтовых полюса, для третьего подготовлен каркас

Сравнение технологических особенностей изготовления цилиндрических компенсирующих соленоидов и винтовой обмотки показало следующее. Системы выполнены по единой технологии и из одинаковых материалов. Намотка соленоидов велась послойно с равномерным натяжением сверхпроводящего кабеля, 8 кг. Равномерное натяжение кабеля в винтовой обмотке - трудноосуществимо, из-за необходимости непрерывной фиксации кабеля на поверхности полюса, однако, и оно было выполнено, правда, с вариацией силы натяжения с точностью до коэффициента-2. Это привело к снижению плотности укладки кабеля, и снижению продольного поля с 22 до 17 кЭ.

Для предупреждения появления возможных термических напряжений свыше допустимых, при охлаждении системы, обмотки, как и силовая рама, охлаждались и нагревались со скоростью не более 10 К/с.



Рис. 12. На винтовую обмотку одеты силовые каркасы

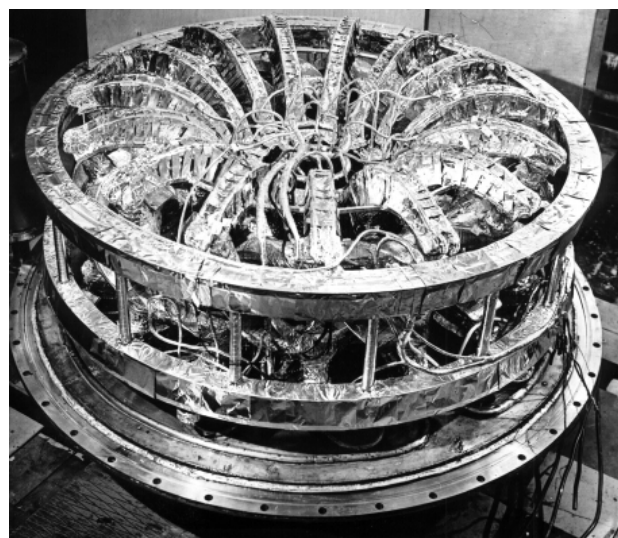


Рис. 13. Магнитная система Кристалла-2 в сборе. Внутри верхнего соленоида видны радиальные, С-образные элементы силового каркаса. Все охлаждаемые элементы обмотаны поглощения тепловой излучения, поскольку через внешний радиационный азотоохлаждаемый экран вводится много "теплых" рабочих элементов

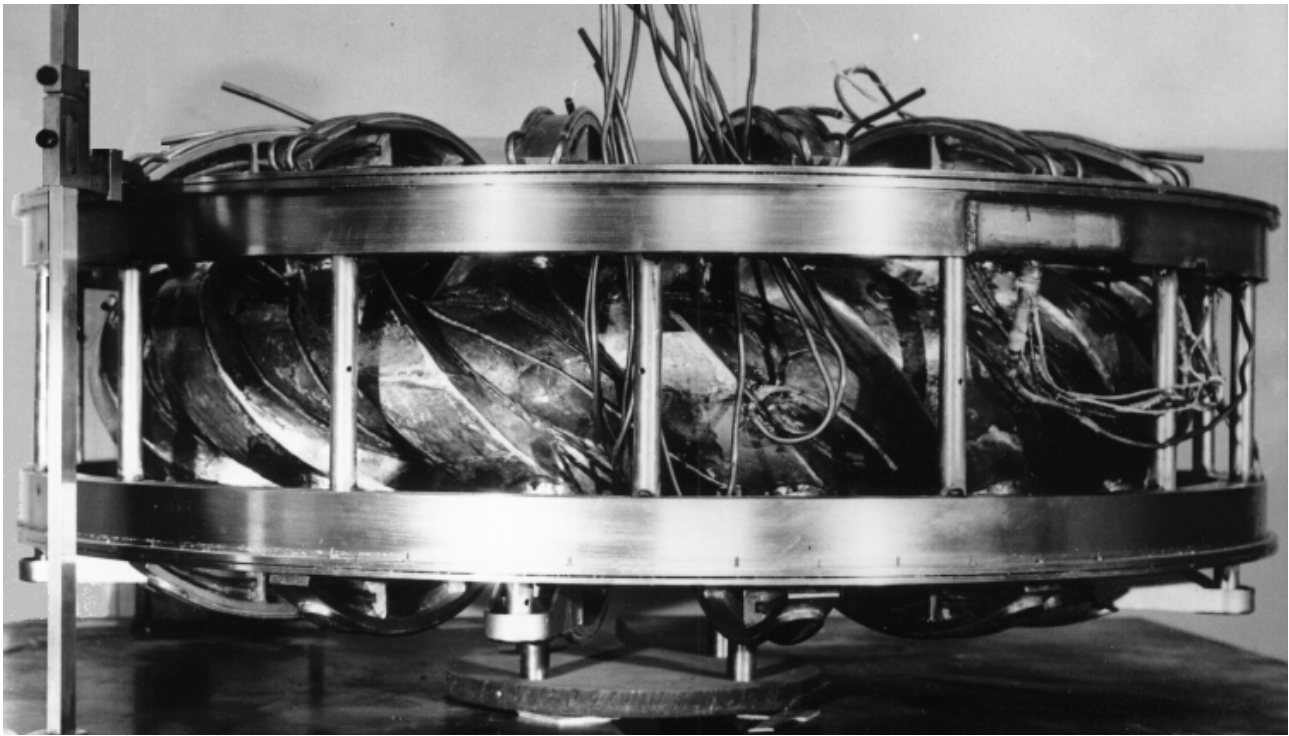


Рис. 14. Магнитная система Кристалла-2 в сборе. На первом плане видны компенсирующие соленоиды с силовыми распорками. Между ними просматривается винтовая обмотка

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ

В процессе криогенных и токовых испытаний цилиндрических компенсирующих и винтовой торoidalной систем была установлена существенная связь токов в обмотке и фазового состояния проточного, охлаждающего гелия. Эффект носит пороговый характер и устойчивое сверхпроводящее состояние обмотки, ток до 600 А, достигается при объемном паросодержании гелия, β , около 20÷25%. При объемных паросодержаниях на входе 50÷60% сверхпроводимость теряется уже при 10 А, см. Рис. 15 и 16 [18].

На установке К-2 выполнены две экспериментальные работы. Разработка методики определения магнитной топографии торсатронов, проводилась для установки Ураган-3. Исследование торможения плазмы на газовой мишени. Таким образом моделировалась эффективность газового blankets в диверторе. Работа проводилась для уточнения расчетов теплового режима диверторных пластин международной установки "Интер" [19]. В связи с идентичностью магнитных топографий, но более высоких параметров установки У-3, дальнейшие работы на К-2 были остановлены.

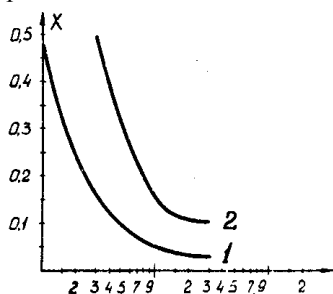


Рис. 15. Зависимость величины коэффициента паросодержания для потока двухфазного гелия от массового расхода 1 – на входе криостата сверхпроводящего полюса; 2 – на его выходе

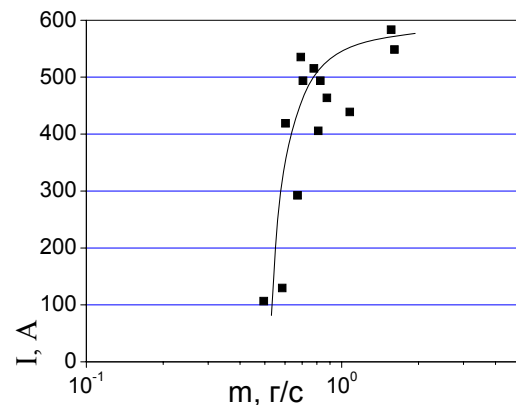


Рис. 16. Зависимость величины критического тока от массового расхода

ВЫВОДЫ, ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования сверхпроводящих, СП-, магнитных систем включали разработки сильноточных токонесущих элементов, например, трубчатого типа, и позволили создать несколько оригинальных крупных СП-соленоидов, служивших макетами СП - торсатронов "Кристалл-1" и "Кристалл-2" с величиной максимального поля, H_{max} до 50 кЭ. В обмотках торсатрона "Кристалл-2" впервые в СССР была применена разработанная в лаборатории технология замоноличивания СП-обмоток, созданы крупногабаритные, ~ 1.8 м в диаметре, частично стабилизированные, с косвенным охлаждением, системы сложной формы с конструктивной плотностью тока до $2 \cdot 10^4$ А/см² и запасенной энергией ~ 1 МДж. Магнитная система обладала высоким энерго- весовым отношением, что по двум этим параметрам находилось выше уровня мировых результатов, см рис7 [12].

При замене нержавеющей стали и медного каркасов компенсирующих соленоидов на алюминиевый, вес соленоидов мог быть значительно уменьшен, более чем вдвое. Такого типа СП- обмотки представляли уже интерес для космических аппаратов, пересекающих земные радиационные пояса, для защиты их магнитным полем от электронной компоненты земных радиационных поясов. Аналогичного вида системы для космических аппаратов были затем созданы в США.

Сравнительно малые размеры установки К-2 определили большинство принципиальных трудностей, например, высокую плотность тока в обмотке. Увеличение размеров системы приведет, при тех же величинах поля, к линейному снижению плотности транспортного тока, поскольку размер полюса растет квадратично с ростом системы см. Рис. 2. Анализируя возможность построения крупных сверхпроводящих систем стеллараторного типа мы считаем, что необходимо идти по пути создания модульных разборных систем, с транспортными токами в несколько МА. Ряд возможных дискретных соленоидов описан в [20], определенные трудности представляют разборные сверхпроводящие контакты на ток около 10 кА и возможность получения контактных сопротивлений около 10^{-8} - 10^{-9} Ом.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАГНИТНЫЕ СЕПАРАТОРЫ С ВЫСОКИМ ГРАДИЕНТОМ.

Накопленный физико-технологический опыт при сооружении сложных сверхпроводящих систем позволяет в настоящее время решать современные технологические задачи, стоящие на повестке дня перед наукой и техникой Украины. Наиболее актуальной на наш взгляд является задача создания сверхпроводящих высокоградиентных магнитных сепараторов, ВГМС.

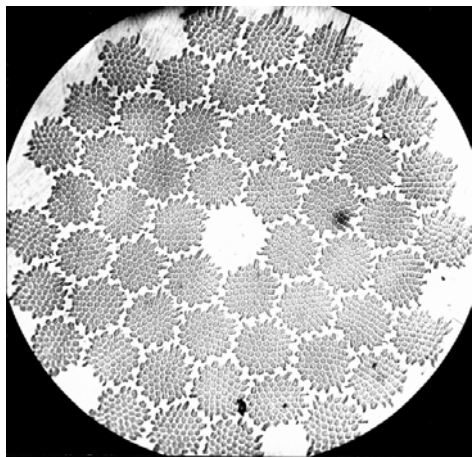


Рис. 17. Разрез сверхпроводящего кабеля диаметром 0.85 мм, диаметр сверхпроводящей жилы 5 мкм, количество 2970

Следует заметить, что в настоящее время качество сверхпроводящих кабелей существенно улучшилось, см. Рис. 17 и 18, на которых представлены токовые характеристики и сечение нового СП кабеля разработки ХФТИ [15]. Это позволяет создавать надежные сп- магнитные системы с косвенной системой охлаждения и внутренней стабилизацией с высокими энерго-весовыми показателями.

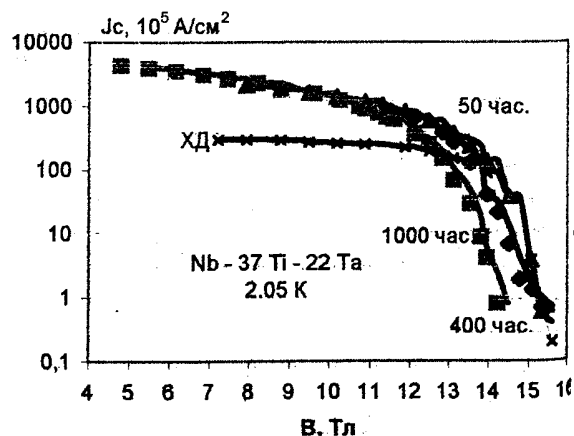


Рис. 18. Зависимость плотности тока от поля для Nb-37Ti-22Ta сверхпроводника при различных длительностях обработки

Применение этого кабеля осуществляется на разрабатываемом в ННЦ ХФТИ сверхпроводящем сепараторе с высоким градиентом магнитного поля, около $500 \text{ Тл}^2/\text{м}$ при 5 Тл, предназначенном для слабомангнетного минерального сырья и биообъектов [16]. Это можно считать значительным шагом, например, по сравнению с системой [17], в которой достигнуты значения магнитного градиента и величины напряженности на уровне соответственно $250 \text{ Тл}^2/\text{м}$ при 7 Тл. Полученный эффект объясняется применением новой топографии магнитной системы, не использовавшейся при сооружении магнитных сепараторов. Магнитная система состоит из встречно включенных соленоидов, с областью нулевого поля между ними см. Рис. 19, 20 [16].

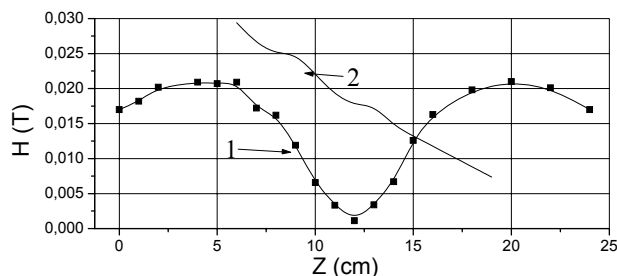


Рис. 19. Осевое распределение магнитного поля в двух встречно включенных соленоидах, кривая - 1. Осевое распределение поля в одиночном соленоиде, кривая - 2

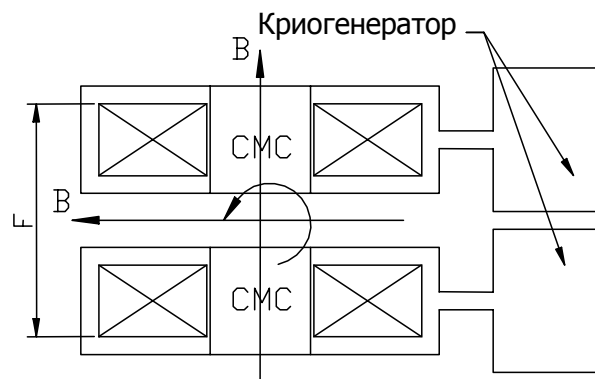


Рис. 20. Схематический вид магнитной системы сепаратора

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Исследование возможности получения стационарных иагнитных полей в катушках, охлаждаемых жидким водородом. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, С.Ф. Гришин. ЖТФ 31, 459, 1961 г.
- [2] Получение импульсных магнитных полей в катушках, охлаждаемых до низких температур. Е.С. Боровик, А.Г. Лимарь. ЖТФ 32 441 1962 г.
- [3] Ионизация быстрых атомов водорода магнитным полем. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, В.А. Коваленко, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Ядерный Синтез 5 85 1965 г.
- [4] Магнитная ловушка с сильным магнитным полем. Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, В.А. Коваленко, В.Б. Юферов. Е.И. Скибенко,
- [5] Импульсная прочность металлов при низких температурах. Е.С. Боровик, В.Г. Волоцкая, М.Ш. Мамедов. Сб. Физика плазмы и УТС. 4 484. Киев 1965 г.
- [6] Криогенная магнитная ловушка ВГЛ-2 Е.С. Боровик, Ф.И. Бусол, Б.В. Гласов В.А. Коваленко, Е.И. Скибенко, В.Б. Юферов. Атомная Энергия 21 130 1966 г.
- [7] Магнитное поле винтовых токов, текущих по поверхности тора. В.Ф. Алексин. Сб. Физика плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. В.3. Издательство АН УССР Киев 1963 с. 216.
- [8] Исследование сверхпроводящей замкнутой магнитной системы сложной формы. Б.В. Гласов, В.Г. Котенко, В.И. Курносов, Г.Г. Лесняков, В.А. Мерзликин, Г.Т. Николаев, Ю.В. Холод, В.Б. Юферов. ВАНТ Сер. Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость. Вып 1(1) Харьков ХФТИ 73-30, 1973, с. 84-87.
- [9] Исследование работы сверхпроводящих соленоидов с различными способами охлаждения и теплопередачи. Б.В. Гласов, О.С. Друй, В.Г. Котенко, В.И. Курносов, Г.Г. Лесняков, В.А. Мерзликин, Г.Т. Николаев, В.Б. Юферов. ВАНТ Сер. Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость. Вып. 1(1) Харьков ХФТИ 73-30, 1973, с. 88-93.
- [10] Сверхпроводящие замкнутые системы установок "Кристалл-1" и "Кристалл-2". М.Ю. Бредихин, А.В. Георгиевский, Б.В. Гласов, О.С. Друй, В.Е. Зисер, В.Г. Котенко, В.И. Курносов, Г.Г. Лесняков, А.С. Логинов, В.А. Мерзликин, Г.Т. Николаев, Е.И. Скибенко, Ю.Ф. Сергеев, Л.Г. Сороковой, В.А. Супруненко, В.Т. Толок, Ю.В. Холод, В.Б. Юферов. ВАНТ Сер. Физика плазмы и проблемы УТС. Вып 1(1) Харьков ХФТИ 73-20, 1973 с. 5-7.
- [11] Исследование предельных характеристик сверхпроводящих компаундированных соленоидов. Б.В. Гласов, О.С. Друй, В.И. Курносов, В.А. Мерзликин, Г.Т. Николаев, Е.И. Скибенко В.Б. Юферов. ВАНТ Сер. Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость. Вып 1(4) Харьков ХФТИ 76-49, 1976, с. 29-31.
- [12] Сверхпроводящий торсатрон "Кристалл- 2". Е.И. Скибенко, В.А. Супруненко, В.Б. Юферов. Атомная Энергия 6. 1980. 450.
- [13] Криогенные насосы в исследованиях по управляемому термоядерному синтезу. В.Б. Юферов, Л.Г. Сороковой. ВАНТ Сер. Низкотемпературная адсорбция и криогенный вакуум. Харьков ХФТИ 72-9, 1971, с. 145-150
- [14] Cryogen pumping of a fusion reaktor. V.B. Yuferov. V.S. Vojtsenya. E.I. Skibenko. Yu.V. Kholod. FUSION REAKTOR DESIGN PROBLEM. Vienna IAEA. 1974 p. 419.
- [15] О разработках Nb-Ti сверхпроводников с высоким значением J_c , производимых в ННЦ ХФТИ О.В. Черный. ВАНТ Сер. Чистые металлы и сверхпроводники Харьков 1999 г., с. 10.
- [16] V.B. Yuferov, Y.V. Kholod, O.V. Chernyi, E.I. Skibenko, L.G. Sorokovoy, N.A. Kosik, V.O. Ilichova, E.V. Mufel, V.F. Malets, "HIGH-GRADIENT MAGNETIC SUPERCONDUCTING SEPARATOR FOR FEEBLY MAGNETIC COMPOUNDS", Proceedings of CEC/ICMC-2001 International Conference, July, 16-22, 2001, Wisconsin, Madison, USA", Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 47-48 (to be published).
- [17] Cryofree OGMS Systems for Magnetic Separation. Research matters, Issue 9, Perspectives on the world of low temperature research from Oxford Instruments, Autumn 1998 г.
- [18] Выбор режима охлаждения сверхпроводящей магнитной системы торсатрона "Кристалл-2". Об охлаждении сверхпроводящей магнитной системы торсатрона "Кристалл-2" Б.В. Гласов, О.С. Друй, В.И. Курносов, Е.И. Скибенко В.Б. Юферов. ВАНТ Сер. Общая и ядерная физика. Вып 3(17) Харьков ХФТИ, 1981, с. 59-65, 66-71.
- [19] Исследование диссипации потока плазмы на газовой мишени. Б.В. Гласов, В.И. Курносов, Э.А. Лысенко, Е.И. Скибенко, А.Е. Сурков, В.Б. Юферов. Физика Плазмы т. 11, вып. 11 1985 г. с. 1431.
- [20] Свойства магнитных поверхностей стеллараторов без винтовых обмоток. В.Т. Толок, В.А. Супруненко, В.Б. Юферов, Е.Д. Волков, В.Г. Котенко, Г.Г. Лесняков, Промежуточный отчет по научно-исследовательской теме 5-02-05-01- $\frac{24}{20K}$ $\frac{28-3}{28-3}$, № госрегистрации У 28714 ИК инв. № 661, ННЦ ХФТИ, 1979.
- [21] Программа "Ураган" Дополнение к эскизному проекту установки "Ураган-3". В.Т. Толок, В.А. Супруненко, В.Б. Юферов, А.В. Георгиевский, Л.Х. Китаевский, О.В. Бирюков. Утверждено: В.Е. Иванов. Харькоа 1972 г.

Поступила 22.01.03