

8 - 8826

Ш - 658

ШИШОВ

Юрий Александрович

СОЗДАНИЕ В ЛВЭ ОИЯИ КОМПЛЕКСА СТЕНДОВ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ.
ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ
УСТРОЙСТВ КОМПЛЕКСА

Специальность 05.14.11 - электрофизические
установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

доктор технических наук
профессор А.Г.ЗЕЛЬДОВИЧ.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
старший научный сотрудник Е.Д.КЛИМЕНКО,
кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник Б.С.НЕГАНОВ.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры (Ленинград)

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 197 г.

на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий.

Адрес: г.Дубна, Московской области, ОИЯИ,

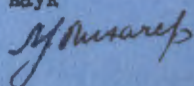
конференц-зал Лаборатории высоких энергий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета

кандидат физико-математических наук

старший научный сотрудник



М.Ф.ЛИХАЧЕВ

8 - 8826

ШИШОВ
Юрий Александрович

СОЗДАНИЕ В ЛВЭ ОИЯИ КОМПЛЕКСА СТЕНДОВ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ.
ИССЛЕДОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ
УСТРОЙСТВ КОМПЛЕКСА

Специальность 05.14.11 - электрофизические
установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Техника создания сверхпроводящих магнитов (СМ) в настоящее время достигла высокого уровня. Использование СМ способствует прогрессу исследований в области физики высоких энергий, так как позволяет уменьшить капитальные затраты при строительстве ускорителей, снизить стоимость анализирующей и диагностической аппаратуры и сократить расход электроэнергии при их эксплуатации.

Процесс создания СМ протекает при активном участии научно-исследовательских институтов, использующих эти магниты, что выражается не только в разработке и изготовлении физической аппаратуры, но и в проведении исследований сверхпроводящих, электроизоляционных и конструкционных материалов. Подобная работа ведется и в ОИЯИ [1, 2, 3].

Базой для развития сверхпроводящей техники в ОИЯИ служат установки криогенного отдела Лаборатории высоких энергий (КО ЛВЭ), в том числе комплекс стэндов, установок и приспособлений, предназначенный для подготовки, испытания и исследования сверхпроводящих магнитных систем (СМС).

Реферлируемая диссертация является обобщением разработок и исследований, направленных на создание комплекса стэндов и некоторых физических установок.

В комплекс входят:

1. Установка для измерения зависимости критического тока J_c от внешнего магнитного поля H коротких образцов сверхпроводящих обмоточных материалов ($J_{max} = 6,5$ кА; $H_{max} = 6,36 \cdot 10^6$ А/м (80 кЭ) (гл. 1).

2. Стенд для испытания соленоидов с наружным диаметром до 30 см и длиной до 70 см (описание соленоидов см. гл. 2) и сильноточных тоководов.

3. Стенд для испытания СМС и их элементов в криостате внутренним диаметром 80 см ($J_{max} = 5$ кА) (гл. 2, 3, 4). Стенд оснащен соленоидом внутренним диаметром 35 см ($J_c = 1,85$ кА, $E=0,22$ МДж).

4. Стенд для измерения электрической прочности изоляции ($U_{max} = 80$ кВ) (гл. 4).

5. Установка для градуировки датчиков температуры (гл. 4).

6. Стенд для исследования работы соленоидов при условиях косвенного термостатирования (гл. 5).

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

В главе I содержится описание установки для измерения зависимости $J_c(H)$ коротких образцов сверхпроводника, в том числе штоков для введения образцов в гелиевый криостат. Разработаны сильноточный (до 6,5 кА) и многопозиционный штоки (до 0,5 кА). Последний позволяет разместить на стабилизированном винтовом шунте более двадцати коротких образцов. Запись вольт-амперных характеристик всех образцов можно осуществить за один цикл ввода-вывода тока. Применение такого устройства позволяет значительно повысить производительность испытаний образцов.

Проведено исследование работы винтового шунта. Измерена зависимость температуры шунта от силы протекающего по нему тока. Проанализировано влияние нагрева на точность определения J_c и показано, что при измерении одной зависимости $J_c(H)$ ошибка быстро снижается с увеличением H и составляет в данных условиях $\sim 0,3\%$ J_c при $H = 6,36 \cdot 10^6$ А/м (80 кЭ). Рассмотрены другие систематические ошибки, присущие данной методике (влияние магнитного поля шунта, деление тока между шунтом и образцом), и сделан вы-

вод о их допустимости для технических измерений. Даны рекомендации по выбору размеров шунта.

На примере испытаний шины сечением $5 \times 2,5$ мм² описана методика измерения J_c сильноточных образцов. Шина впервые изготовлена фирмой "Суперков" (США) по техническому заданию, разработанному в КО ЛВЭ. В медной матрице шины содержится 1500 ниобий-титановых жил диаметром 60 мкм.

Глава 2 посвящена описанию лабораторных соленоидов, которыми оснащены стенды, а также некоторых пробных и модельных соленоидов. Для испытания коротких образцов сверхпроводника разработаны внутренне стабилизированные соленоиды: один с $H_{oc} = 5,17 \cdot 10^6$ А/м (65 кЭ), второй с $H_{oc} = 6,36 \cdot 10^6$ А/м (80 кЭ), однородность магнитного поля 10^{-5} в объеме 1 см³ и 10^{-2} на длине 20 см.

Испытаны пробные соленоиды из провода диаметром 0,5 мм с ниобий-титановыми жилами диаметром 65 мкм. Подтверждена возможность применения этого проводника для изготовления небольших прецизионных соленоидов.

Эксперименты с двумя пробными соленоидными из многожильной шины сечением $5 \times 2,5$ мм² позволили рекомендовать ее для изготовления соленоида внутренним диаметром 0,6 м и длиной 2,4 м, который входит в криогенную ускорительную секцию кольцетрона [2],[3]. Соленоид и градиентные катушки, навитые проводом диаметром 0,5 мм, успешно испытаны.

В соленоиде внутренним диаметром 100 мм прошла проверку большая партия сильноточной шины (ширина 40 мм) на основе станида ниобия [4].

При разработке технических предложений по многокубовой водородной пузырьковой камере в КО ЛВЭ выполнен эскизный проект СМ, создающего магнитное поле в фотографируемом объеме [5]. Для получения опыта работы с крупными стабилизированными СМ в 1969 г. изготовлена СМС с модельным соленоидом внутренним диаметром 35 см (см. рис. 1 и 2) [6]. Соленоид имеет полную криостатическую стабилизацию и оптимизирован по расходу сверхпроводника. Вес соленоида составляет 700 кг, $J_c = 1,85$ кА, $H_{oc} = 1,8 \cdot 10^6$ А/м (22,7 кЭ), $E=0,22$ МДж. Проведена серия экспериментов по эвакуации энергии из соленоида с помощью сверхпроводящего выключателя (СВ) на омическую нагрузку и на дугогасительную решетку автомата гашения поля (АГП). Даже при максимальных токе (1,4 кА) и напряжении (0,9 кВ) удавалось вывести из криостата не менее 95% запасенной энергии ($dH/dt \approx 6,36 \cdot 10^6$ А/(м·с)) (80 кЭ/с).

В главе 3 обсуждаются некоторые вопросы криогенного обеспечения стендов. Разработана и используется серия широкогорлых гелиевых криостатов с внутренними диаметрами 20, 30, 50 и 80 см. Криостаты экранируются жидким азотом [7].

Рассмотрены конструкции и результаты исследования криостата внутренним диаметром 80 см [8]. Приведено описание системы охлаждения соленоида внутренним диаметром 35 см, который установлен в криостате, соединенном трубопроводом длиной 18 м с гелиевым охладителем. Охлаждение идет "ступенями" при последовательном включении ванн охладителя [10].

Измерены распределение температур вдоль внутренней обечайки и в газовом пространстве (рис. 3), а также количество выходящего в час из криостата гелия V (рис. 4) в течение $t = 16$ часов после окончания заливки гелия.

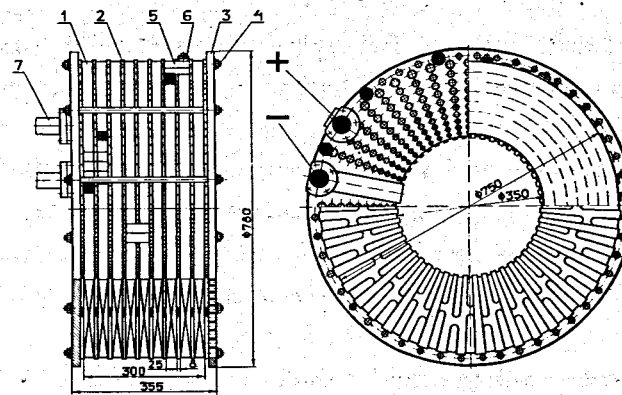


Рис. 1. Соленоид с внутренним \varnothing 35 см; 23 кЭ.

1 - обмотка; 2 - проставки; 3 - фланцы; 4 - шпильки; 5 - электрические контакты; 6 - замок; 7 - тоководы.

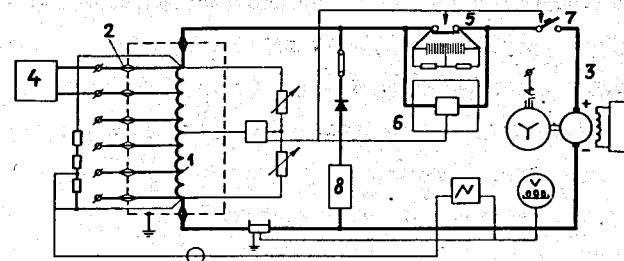


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема СМС с соленоидом внутренним \varnothing 35 см. 1 - соленоид; 2 - тоководы основные (2,5 кА) и дополнительные (1кА); 3 - мотор-генератор АНГ - 5000/2500; 4 - тиристорный источник (2,5 кА; 6В); 5 - автомат гашения поля АГП-30-32; 6 - сверхпроводящий выключатель (1,4 кА; 7 Ом); 7 - выключатель АВ45-6000; 8 - гасительное сопротивление.

Принято считать, что равновесные условия над уровнем жидкого гелия наступают достаточно быстро, в данном случае, судя по кривой $V(t)$, через 2,5-3 часа. Дальнейшее постепенное уменьшение V связывают с понижением уровня гелия и соответствующим удлинением тепловых мостов. Однако измерения температур показывают (рис. 4), что в большом криостате процесс стабилизации растянут. Это объясняется наличием запаса холодного газа, накопившегося во время охлаждения.

Теплопритоки в жидкий гелий по внутренней обечайке и газовому столбу даже при $t = 16$ час составляют $\sim 2,5\%$ суммарного теплопритока. Следовательно, наличие широкой горловины не приводит в переходном периоде к существенным потерям жидкого хладагента.

Проведено сравнение теплопритоков по горловине в переходном и установившемся режимах. Для расчета теплопритока в установившемся режиме составлена программа на ЭВМ, учитывающая зависимость теплопроводности газа и стенки от температуры [9].

Испытания размещаемых в криостате устройств начинаются сразу после заливки гелия и, следовательно, идут в переходном режиме, что необходимо учитывать при расчете теплопритоков.

В главе 4 дается обзор используемых в стендах источников электропитания и устройств аварийной эвакуации запасенной в соленоидах энергии.

Стенды оснащены типовыми промышленными источниками, модернизация которых проведена в криогенном и электротехническом отделах ЛВЭ. Эта работа выразилась в создании систем управления, которые обеспечивают ввод тока в соленоиды с заданными скоростями и стабилизацию тока до уровня 10^{-3} . В эксплуатации находятся три полупроводниковых выпрямителя и мотор-генератор типа АНГ (5 кА при 6 В).

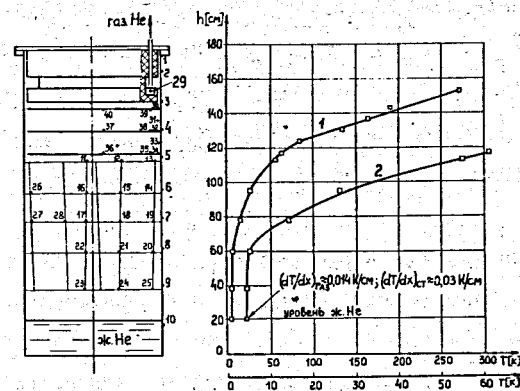


Рис. 3. Расположение датчиков температуры в криостате внутренним $\varnothing 80$ см и распределение температуры в газообразном гелии через ~ 16 часов после заливки до уровня 30 см.
1 - по верхнему масштабу температуры.
2 - по нижнему масштабу температуры.

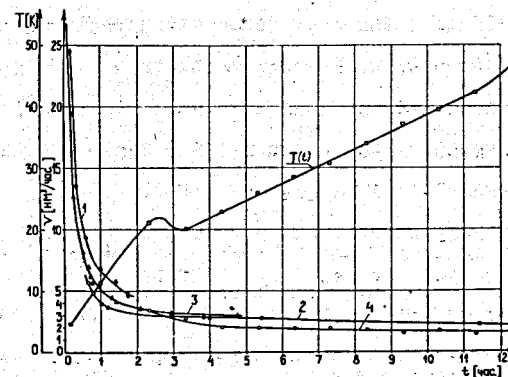


Рис. 4. Зависимость испаряемости V криостата внутренним $\varnothing 80$ см от времени t после окончания заливки.
1 - заливка до уровня 98 см; 2 - до 54 см; 3 - до 82 см; 4 - до 30 см.
Температура T нижнего плавающего экрана (соответствует кривой 4).

Ведутся исследования сильноточных СВ теплового управления [11]. Создан СВ с $J_c = 1,4$ кА и сопротивлением в нормальном состоянии 7 Ом. Время перевода СВ в нормальное состояние при $J/J_c = 0,8$ составляет $\leq 0,5$ мс. Испытываются модернизированные АП с дугогасительной решеткой, которые позволяют вести эвакуацию оптимальным образом.

Приводятся характеристики установок для испытания изоляционных материалов на электрическую прочность и для калибровки датчиков температуры.

Описываются разработанные в КО ЛВЭ установки для изготовления экспериментальных сверхпроводящих шин методами пайки и электролитического осаждения [12]; на которых получены шины для нескольких лабораторных соленоидов [13] и соленоида внутренним диаметром 35 см [6].

Глава 5 посвящена вопросам термостатирования сверхпроводящих магнитов без подвода жидкого гелия к обмотке [14]. Экранировка от внешних теплопритоков и удаление внутренних тепловыделений в таких системах осуществляется косвенным путем — теплопроводными путями по обмотке, каркасу и т.п. к жидкому гелию.

В условиях косвенного термостатирования без деградации J_c могут работать только внутренне стабилизированные проводники, но и в этом случае необходимо отводить тепловыделение, связанное с гистерезисными и вихревыми потерями в сверхпроводящих обмотках при вводе и выводе тока.

Обсуждаются преимущества и возможные области применения СВ косвенного термостатирования и рассматривается осуществленный в ЛВЭ вариант системы с ванной жидкого гелия. При этом использованы соле-

ноиды, обмотки которых не пропитываются связующими веществами для закрепления витков и улучшения теплопроводности.

Выведены формулы для расчета распределения гистерезисных тепловыделений в длинном соленоиде с относительно тонкой стенкой (рис. 5) и зависимость удельных тепловыделений от величины достигнутого поля (рис. 6). Найдена температура перехода T_n сверхпроводника в обмотке с учетом значения J и H каждой точки (рис. 7). Вычислена величина повышения температуры обмотки из-за гистерезисных тепловыделений T_h в начале и конце ввода тока (рис. 7 и 8). Получена зависимость между допустимой скоростью ввода тока в соленоид и теплопроводностью его обмотки.

Создана установка для исследования работы соленоидов, которые находятся в вакууме и термостатируются путем контактирования их каркаса с ванной жидкого гелия (рис. 9) [14]. Экспериментально показано, что величина J_c соленоида не отличается от значения, полученного при испытании в жидком гелии.

На модельной непропитанной катушке измерена теплопроводность обмотки при давлении $\sim 10^{-4}$ тор при различных температурах (например, при 4,5 К $\lambda = 2,6 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К) .

Описанный способ термостатирования соленоидов успешно применен на электронно-лучевом источнике многозарядных ионов ("Крион") [1].

ВЫВОДЫ

1. Разработан комплекс стандов, установок и приспособлений, предназначенный для проведения наладки, разносторонних испытаний и исследований сверхпроводящих магнитных систем.

2. Создана модельная сверхпроводящая магнитная система с соленоидом внутренним диаметром 35 см ($J_c = 1,85$ кА,

$H_{0c} = 1,8 \cdot 10^6$ А/м (22,7 кЭ), $E = 0,22$ МДж).

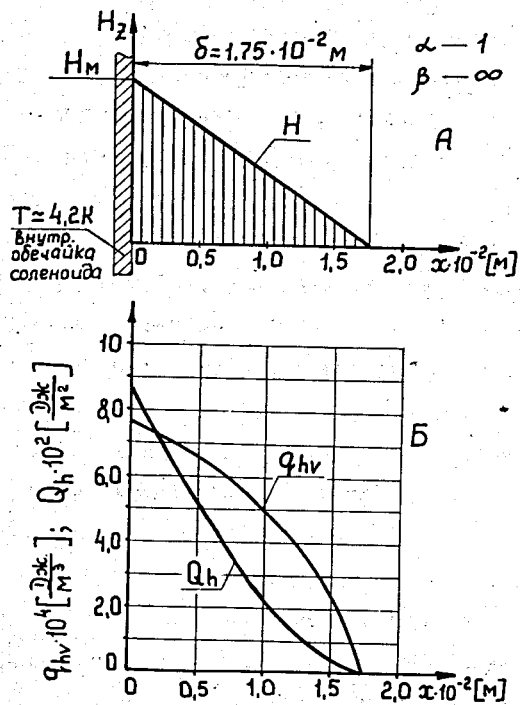


Рис.5. Гистерезисные тепловыделения в бесконечно длинном соленоиде ($\beta \rightarrow \infty$) с относительно тонкой обмоткой ($\alpha \rightarrow 1$) при изменении H_M от 0 до $H_{MM} = 4,78 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ (60 кЭ). А - распределение напряженности магнитного поля H в продольном сечении соленоида; Б - распределение гистерезисных тепловыделений в единице объема обмотки (q_{hv}) и в объеме $I \cdot I(\delta - x) \text{ м}^3$ (Q_h).

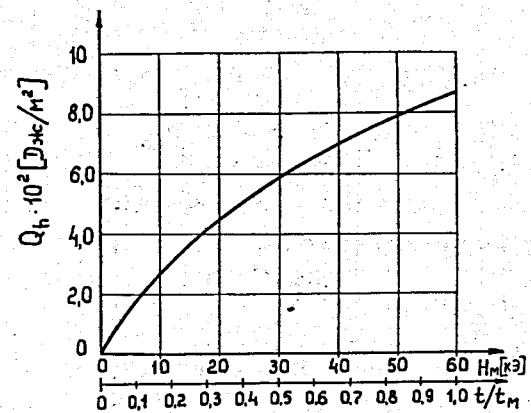


Рис. 6. Зависимость гистерезисных тепловыделений Q_h ($x=0$) в обмотке соленоида ($\alpha \rightarrow 1$, $\beta \rightarrow \infty$) от достигнутой напряженности H_M внутри соленоида при вводе тока.

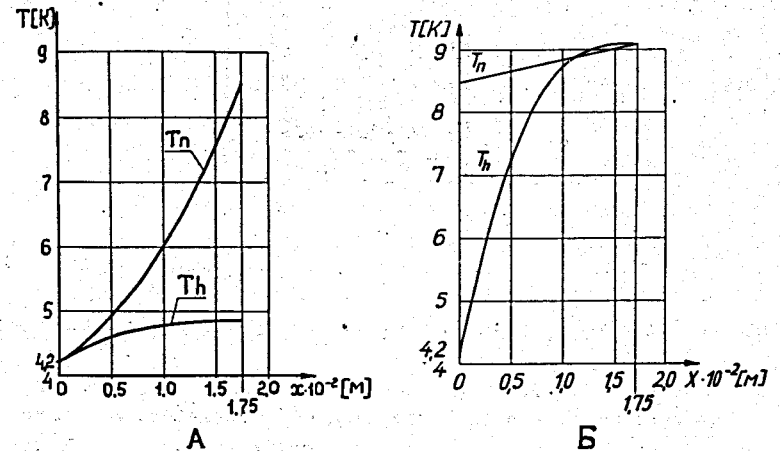


Рис.7,8. Распределение температур по обмотке соленоида с $H_{MM} = 4,78 \cdot 10^6 \text{ А/м}$ (60 кЭ). T_n - температура перехода сверхпроводника в нормальное состояние. T_h - допустимая температура обмотки.

А - при $H_M = H_{MM}$. Б - при $H_M = 1/6 H_{MM}$.

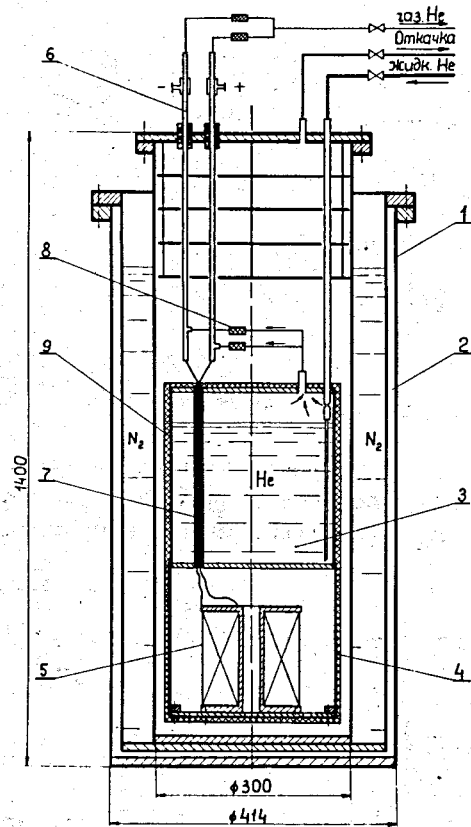


Рис. 9. Схема установки для исследования работы соленоида в вакууме.

1 - кожух криостата; 2 - азотный бак; 3 - ванна с жидким гелием; 4 - медная обечайка; 5 - соленоид; 6 - токовые вводы; 7 - трубка, в которой осуществлен тепловой контакт токовых вводов и ванны; 8 - соединение гелиевого трубопровода с токовводом, уплотняемое электроизоляционной прокладкой.

3. Испытаны короткие образцы и пробные соленоиды из сильноточной многожильной шины сечением $5 \times 2,5 \text{ мм}^2$. Шина успешно использована в соленоиде внутренним диаметром 0,6 м и длиной 2,4 м. Также проведены испытания разнообразных сверхпроводящих обмоточных материалов, позволившие изготовить лабораторные СМ и соленоиды для физических установок "Крион" и "Кольцетрон".

4. Проведено исследование работы винтового стабилизированного шунта, предназначенного для измерения зависимости $J_c(H)$ коротких образцов сверхпроводника. Даны рекомендации по выбору параметров шунта.

5. Исследована работа в переходном режиме широкогорлого гелиевого криостата внутренним диаметром 80 см.

6. Теоретически и экспериментально исследована работа непропитанных соленоидов, находящихся в вакууме и термостатируемых без подвода жидкого гелия к обмотке. Результаты разработок и исследований использованы в источнике многозарядных ионов "Крион".

Работы, положенные в основу диссертации, проведены в КО ЛВЭ и опубликованы в период с 1967 г. по 1973 г. в журналах ПТЭ [7]; "Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение" [8]; трудах ОИЯИ [4], [5], [6], [10], [12], [14] и доложены на международных и всесоюзных конференциях в Тбилиси (1968) [9], [13]; Дрездене (1969) [6].

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.Г.Аксенов, Ю.А.Шишов и др. Сообщение ОИЯИ, Б8-8563, 1975.
2. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. Сообщения ОИЯИ, Р9-4722, 1969.
3. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. Сообщения ОИЯИ, Р9-5488, 1970.
4. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. Сообщения ОИЯИ, Р8-5440, 1970.
5. В.А.Белушкин, Ю.А.Шишов и др. Сообщения ОИЯИ, 8-3316, 1967.
6. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. Сообщения ОИЯИ, 8-4856, 1969.
7. Д.Д.Токмаев, Ю.А.Шишов. ПТЭ № 4, с. 231, 1969.
8. Ю.Т.Борзунов, Ю.А.Шишов и др. "Криогенное, кислородное и автогенное машиностроение", № 3, 1969.
9. В.А.Васильев, Ю.А.Шишов. "Расчет охлаждаемых тепловых мостов на ЭВМ". Тезисы доклада на XV Всесоюзном совещании по физике низких температур, Тбилиси, 1968.
10. А.Г.Зельдович, Ю.А.Шишов. Сообщения ОИЯИ, Р8-3206, 1967.
11. Х.Менке, Ю.А.Шишов. Сообщения ОИЯИ, Р8-7855, 1974.
12. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. ОИЯИ, Б2-8-7020, 1973.
13. Н.Г.Анищенко, Ю.А.Шишов и др. "Сверхпроводящий соленоид на 40 кэ из стабилизированной паяной ленты". Тезисы доклада на XV Всесоюзном совещании по физике низких температур, Тбилиси, 1968.
14. А.Г.Зельдович, Ю.А.Шишов. Сообщения ОИЯИ, 8-7018, 1973.

Рукопись поступила в издательский отдел
24 апреля 1975 г.