

**СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

88-902

P10-88-902

**В.Ф.Минашкин, С.В.Романов, С.Ю.Селюнин,
Ю.П.Филиппов**

**ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ**

1988

ВВЕДЕНИЕ

Последние 15-20 лет отмечены почти экспоненциальным ростом числа публикаций по проблеме нестационарной теплопередачи в системе "твердое тело — жидкость"^{1-3/}. Столь высокая активность исследований обусловлена не только интенсивностью развивающейся теории переноса, но и потребностями передовой технологии в энергетике, космической и ускорительной технике. Эти потребности, в случае, например, современных ускорителей, могут быть связаны с возможностью спонтанной генерации нормальной зоны и необходимостью предотвращения пережога обмотки, в связи с чем количественная информация о нестационарной теплопередаче к жидкому гелию становится весьма важной. Кроме того, довольно высокая стоимость СМС побуждает разработчиков к предварительной оптимизации СП-магнитов на компьютерных моделях. Как было показано рядом авторов, в частности^{4/}, модель СП-провода, работающего в условиях импульсного энерговыделения, может быть адекватной лишь при учете "тонкой структуры" нестационарных тепловых процессов. Что касается имеющихся экспериментальных данных по нестационарной теплопередаче к жидкому гелию, то приходится признать их недостаточность, неполноту, а также трудность интерпретации и невысокую точность многих из них. Практически не изучено влияние формы теплового возмущения на динамику процесса, а оно может оказаться решающим в случае погруженных систем^{5/}. Нет данных по динамике тепловых процессов в разных участках границы раздела "твердое тело — гелий", а также для прокачных систем^{6/}, где весьма вероятно расслоение потока^{7/}.

В настоящей работе описана аппаратура, которая позволяет проводить исследования, до определенной степени восполняющие отмеченные проблемы.

Модельные исследования нестационарных тепловых процессов проводились на экспериментальном образце, схематически изображенном на рис. 1. Основная часть образца — шесть тепловыделяющих элементов, служащих одновременно малоинерционными нагревателями и высокочувствительными термодатчиками^{8/}. В ТВЭ необходимо задавать импульсы мощности определенной формы, уровня, длительности, скважности и производить измерения величины сопротивления ТВЭ как в процессе действия импульса мощности, так и после его окончания. Сопротивление ТВЭ в рабочей области может принимать значения от 6 до 1 кОм, причем температурный коэффициент сопротивления отрицателен. По этой причине в условиях стабилизации напряжения на ТВЭ практи-

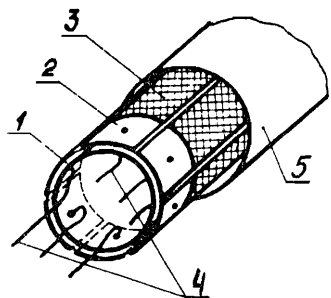
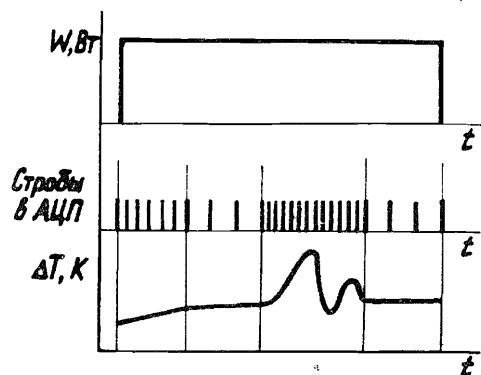


Рис. 1. Экспериментальный образец и временная диаграмма одного из режимов нестационарной передачи: 1 — керамическая подложка; 2 — контактные серебряные площадки; 3 — углеродные пленки; 4 — электропровода; 5 — трубка, образующая канал для криоагента.



чески невозможно идентифицировать причину изменения температуры образца, которая может быть связана как с особенностями нестационарной теплопередачи, так и с ростом во времени тепловой нагрузки из-за снижения сопротивления ТВЭ. Поэтому к устройству питания предъявляется специфическое требование: обеспечить стабилизацию мощности джоулеа тепловыделения в ТВЭ. Диапазон мощности импульсов должен перекрывать интервал удельных тепловых нагрузок на единицу поверхности ТВЭ: $600 \div 60000 \text{ Вт/м}^2$.

Планируемые экспериментальные программы предусматривают подачу на ТВЭ-образец как одинаковых, так и существенно отличающихся импульсов, в связи с чем в системе питания должно быть шесть автономных устройств с соответствующим управлением. При этом управляющая часть должна обеспечивать, кроме прямоугольных импульсов мощности, также и импульсы более сложной формы (треугольные, трапецеидальные и т.д.). Длительность импульсов может находиться в диапазоне от 100 мкс до десятков минут и более. Как показали проведенные эксперименты^{19,10}, для полученных зависимостей перегрева ΔT от времени t характерны участки, имеющие разную скорость изменения ΔT от t . Поэтому желательно, чтобы интервал между измерениями мог быть различным на разных участках импульса мощности. Кроме того, результаты экспериментов продемонстрировали необходимость использовать 12-разрядные аналого-цифровые преобразователи с временем преобразования около 30 мкс. Число экспериментальных точек, которые надо получать за время действия импульса мощности, может достигать ~ 8000 . Для выбора оптимальных режимов работы и контроля необходимо обеспечить в удобном виде вывод результатов измерений, а также запись данных на долговременное устройство хранения в режиме "on-line".

ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА

На рис. 2 приведена структурная схема электронной системы, которая является развитием систем, описанных в^{19,10}. В электронной системе условно можно выделить три части: подсистему питания ТВЭ, измерительную подсистему и подсистему графического представления результатов измерения. В системе предусмотрена возможность проведения калибровки и проверки правильности функционирования элементов. Это реализуется с помощью блока адаптера (БА), эквивалентного сопротивления ($R_{\text{экв}}$) и цифрового вольтметра (ЦВ).

Управляющая и измерительная аппаратура обеспечивает задание мощности в ТВЭ с различными законами изменения во времени, а также измерение величины сопротивлений этих ТВЭ. Аппаратура выполнена в стандарте КАМАК. Управление аппаратурой, начальная обработка, отображение, запись данных осуществляются с помощью ЭВМ MERA-60. Для последующей обработки данных реализована связь с ЭВМ SM1420, которая обеспечивается посредством интерфейса МТТ-60¹². Разработанный пакет программ предназначен для калибровки, проведения экспериментов, обработки и вывода результатов на телевизионный монитор и графопостроитель.

ПОДСИСТЕМА ПИТАНИЯ ТВЭ

Подсистема питания служит для задания в ТВЭ импульсов мощности определенных форм, уровня и длительности. Она состоит из 6 усилителей мощности (УМ) и управляющей части.

Усилитель мощности обеспечивает два режима стабилизации — мощности и напряжения. Каждый УМ имеет два диапазона по выходному напряжению: $20 \div 100 \text{ В}$ и $100 \div 200 \text{ В}$. Максимальная мощность на нагрузке 40 Вт, нестабильность мощности — менее $3 \div 4\%$. Длительность фронтов импульса мощности $\sim 10 \div 20 \text{ мкс}$ (большая величина относится к режиму стабилизации мощности). Время отработки скачкообразного изменения нагрузки менее 40 мкс. В блоке УМ размещена плата, обеспечивающая измерение сопротивления ТВЭ в режиме охлаждения, т.е. после окончания импульса мощности. Конструктивно УМ выполнен в механике стандарта КАМАК и занимает один крейт. Более подробно УМ описан в¹¹.

Управление УМ осуществляется двумя видами сигналов — аналоговым сигналом в диапазоне $0 \div 5 \text{ В}$, с помощью которого задается уровень мощности в нагрузке, и сигналом TTL уровня, который служит для управления длительностью импульса мощности.

Управляющая часть подсистемы питания состоит из генератора аналоговых сигналов (ГАС) и генератора управляющих импульсов (ГУИ). ГАС состоит из блока шестиканального цифроаналогового преобразователя (6ЦАП), блока оперативной памяти КЛЮ24¹³, в кото-

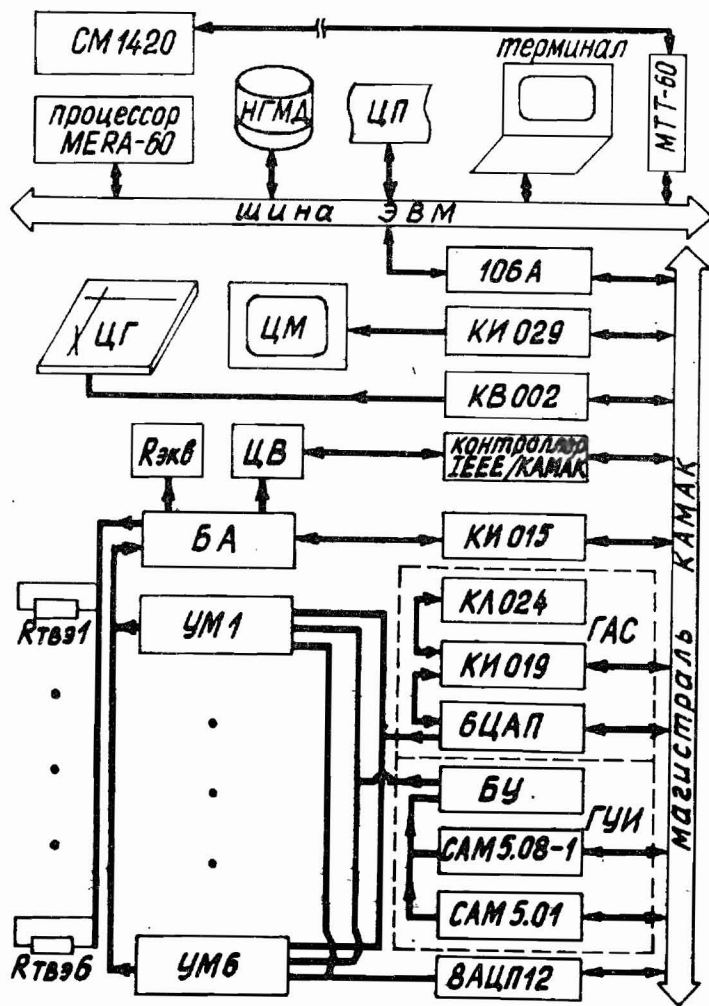


Рис. 2. Структурная схема электронной системы. НГМД – накопитель на гибких магнитных дисках; ЦП – цифрочасть; ЦМ – цветной телевизионный монитор; ЦГ – цветной графопостроитель; БА – блок адаптера; $R_{экв}$ – эквивалентное сопротивление; $R_{ТВЭ1} \div R_{ТВЭ6}$ – сопротивления тепловыделяющих элементов; ЦВ – цифровой вольтметр; УМ1 ÷ УМ6 – усилители мощности; 106А – контроллер тока КАМАК; ГАС – генератор аналоговых сигналов; ГУИ – генератор управляющих импульсов; КИ029 – интерфейс телевизионного монитора; КВ002 – выходной регистр; КИ015 – входной/выходной регистр; 8АЦП12 – 8-канальный 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь; МТТ-60 – интерфейс связи МЕРА-60 с СМ1420; БУ – блок управления; САМ5.01 – генератор опорных частот; САМ5.08-1 – программный генератор импульсов.

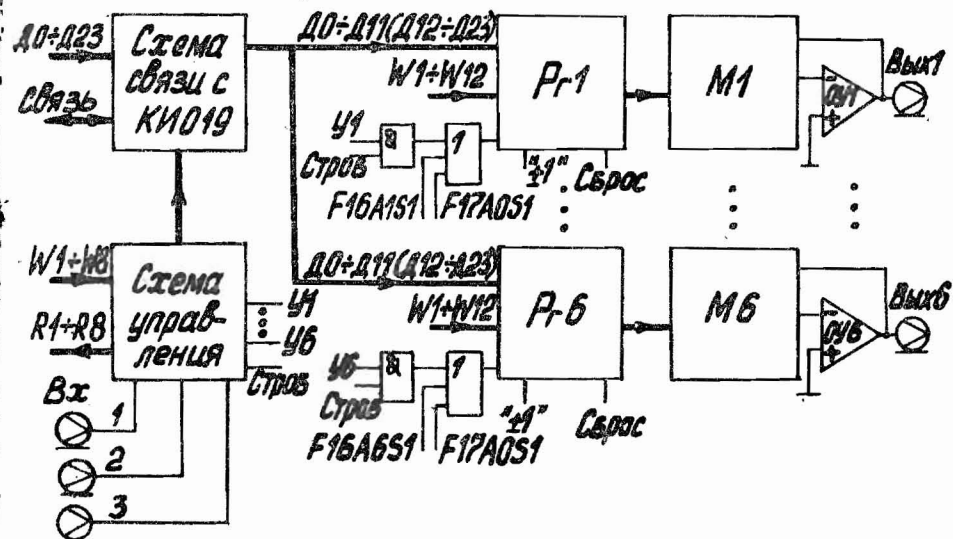


Рис. 3. Структурная схема блока 6ЦАП. P_{г1} ÷ P_{г6} – регистры; М – преобразователь код-аналог; ОУ1 ÷ ОУ6 – буферные усилители.

ром хранятся коды формы и уровня аналогового сигнала на выходе ГАС, и блока инкрементной записи КЛ019^{13/}, с помощью которого осуществляется связь блока КЛ024 с магистралью КАМАК и блоком 6ЦАП.

Блок 6ЦАП специально разработан для данной системы и задает уровень мощности на выходе УМ. Структурная схема блока 6ЦАП показана на рис. 3.

Каждый из 6 каналов блока содержит регистр (P_г) и преобразователь код-аналог (М) с буферным усилителем (ОУ). Применение счетчиков в P_{г1}-P_{г6} позволяет создавать с помощью внешнего генератора импульсов напряжение треугольной и трапецидальной формы на выходах блока 6ЦАП. Получение выходного сигнала более сложной формы осуществляется путем чтения кодов из КЛ024 через КЛ019 с последующей записью этих кодов в P_{г1}-P_{г6}. Связь 6ЦАП и КЛ019 организована через разъемы, расположенные на задней панели блока. Чтение кодов осуществляется с помощью импульсов, поступающих с ГУИ. Данные с магистрали КАМАК можно записать как одновременно во все регистры, так и выборочно в любой из них. Блок 6ЦАП выполнен в стандарте КАМАК единичной ширины, имеет шесть 12-разрядных каналов с выходами 0 ÷ +5 В.

Генератор управляющих импульсов (ГУИ) задает длительность импульса мощности на нагрузке, временное положение и количество импульсов запуска АЦП, а также импульсы для организации в ГАС управляющих сигналов сложной формы. ГУИ состоит из блока генера-

4 -- работа от внутреннего ГТИ, время преобразования $t_{пр} = 200$ мкс:	
5 —	250 мкс
6 —	500 мкс
7 —	1000 мкс.

При работе от внутреннего ГТИ запуск происходит после первого внешнего запускающего импульса. Преобразование разрешается после прохождения функции F26A11 и заканчивается либо после заполнения всей буферной памяти, либо функцией F24A11. Во время преобразования другие обращения к блоку, кроме функций F24A11 и F25A11, блокируются. Функция F16A0 служит для тестирования буферной памяти.

Конструктивно блок выполнен в виде модуля КАМАК единичной ширины.

Диапазон входных сигналов	0:+5 В
минимальное время преобразования	30 мкс
разрядность	12 бит
скорость нарастания входного сигнала	3 В/мкс
время установления входного сигнала	0,5 мкс
входное сопротивление	1 МОм
коэффициент подавления синфазного сигнала	76 дБ
число входов	8
тактовый вход	TTL.

Подсистема графического представления результатов состоит из цветного телевизионного монитора ВКУ-42Ц и цветного графопостроителя WX-4675, управляемых через блоки КИ-029¹⁹ и KB-002²⁰ соответственно. Для представления результатов в графическом виде используется пакет графических программ ГРАФОР²¹.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Структура программного обеспечения приведена на рис. 5. Программные модули обеспечивают работу электронной системы соответственно в режимах калибровки системы питания, сбора данных и предварительного отбора данных с использованием графического представления результатов.

Для указания расположения функциональных блоков в крейте КАМАК во время начального диалога используется программа INIT.

С помощью программы MAIN на экран выводится меню режимов и диапазонов работы, а также задаются имена служебных файлов, используемых другими модулями программы. В зависимости от выбора режима управление передается либо программе CALIBR, либо программе WORK.

Под управлением программы CALIBR осуществляется калибровка системы питания, при этом необходимые измерения обеспечиваются

Рис. 5. Структура программного обеспечения электронной системы.

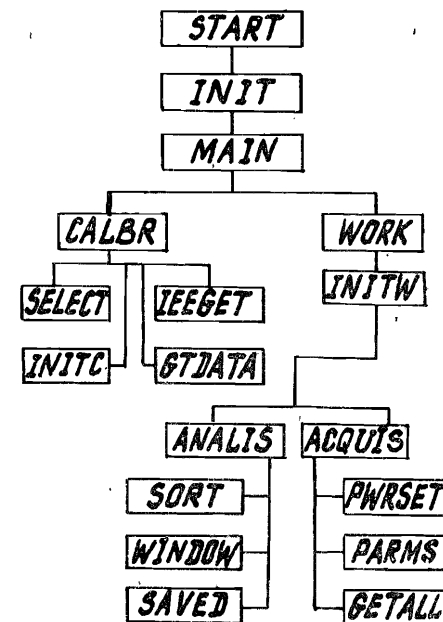
программами SELECT, GTDATA, IEEGET. Программой SELECT осуществляется управление блоком адаптера (БА). Управление измерительными приборами через интерфейс IEEE-488 производится через программу IEEGET. Программа GTDATA осуществляет запись считанных данных в соответствующие выходные файлы. После окончания калибровки управление возвращается в MAIN, и можно переходить в режим измерений.

Установка оборудования в начальное состояние осуществляется с помощью программы INITC.

Режим измерений реализован через программу WORK, которая в свою очередь передает управление программе INITW для установки аппаратуры и выбора одного из двух режимов работы с данными: "Набор" и "Анализ".

Режим "Набор" реализуется с помощью программы ACQUIS, которая передает управление модулям PWRSET, PARMS, GETALL. Через модуль PWRSET осуществляется установка всех цифроаналоговых преобразователей таким образом, чтобы на каждом ТВЭ выделялась заданная мощность, и, кроме того, в блок управления записывается форма импульса. Модуль PARMS предназначен для приема и обработки параметров, характеризующих термодинамические свойства двухфазного потока: расхода, давления, температуры и массового расхода паросодержания. Посредством модуля GETALL осуществляется запуск УМ, оцифровка поступающих данных и заполнение внутренних буферов АЦП.

После набора данных можно перейти в режим "Анализ" и при помощи модуля ANALIS провести предварительную обработку результатов. Через меню в модуле ANALIS запрашивается номер сегмента ТВЭ, цвет кривой на экране монитора, а также начало и конец интересующего интервала времени. Кроме того, можно задать шаг по времени, что может оказаться полезным при предварительном просмотре данных на одном сегменте. После установки параметров управление передается модулю WINDOW, который обеспечивает считывание из буферной памяти АЦП только интересующих данных. Эти данные отображаются на экране монитора в виде зависимости $\Delta T = f(t)$, где ΔT — температура пере-



грева поверхности образца, t — время от начала импульса мощности. При необходимости можно либо увеличить шаг по времени, либо уменьшить его, что позволяет детализировать изменения перегрева сегмента ТВЭ во времени (рис. 1). После окончания предварительного анализа управление передается модулю SAVED, который обеспечивает запись необходимых данных в файл на гибком магнитном диске, передачу данных на один из накопителей CM 1420 или вывод графика на цветной графопостроитель. После окончания анализа данных с одного сегмента управление снова передается модулю ANALIS для анализа данных с другого сегмента ТВЭ.

Программное обеспечение написано на языках Си, Фортран и Макро-11.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проверка электронной системы осуществлялась в эксперименте по исследованию нестационарной теплопередачи к вынужденным потокам двухфазного гелия от шестиканального образца, показанного на рис. 1. Ориентация образца была горизонтальной, а массовая скорость

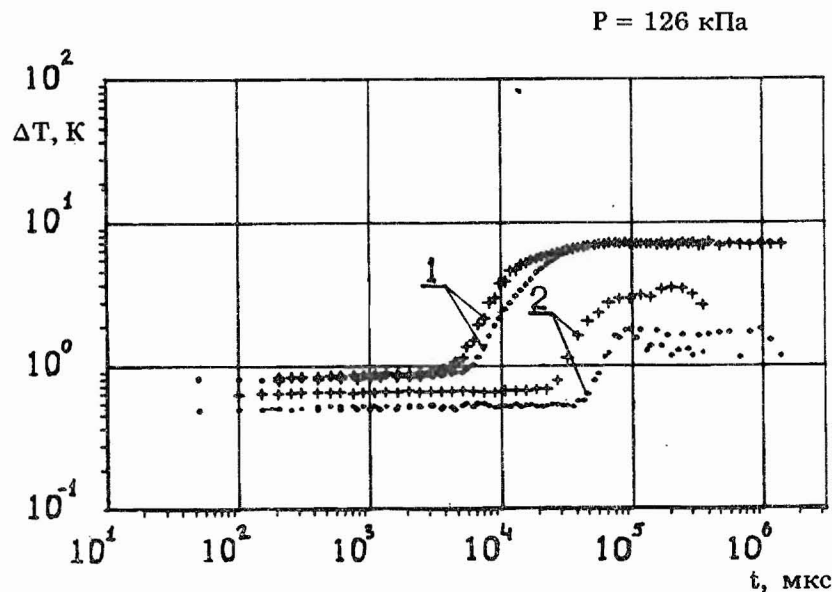


Рис. 6. Зависимости перегрева ΔT поверхности образца от времени t после подачи импульса мощности: \circ — для нижней образующей, $+$ — для верхней образующей, $1 - q = 9100 \text{ Вт/м}^2$, $2 - q = 4540 \text{ Вт/м}^2$; $m = 48 \text{ кг/м}^2 \text{ с}$; $x = 0,32$; $p = 126 \text{ кПа}$.

такова, что реализовывались расслоенные режимы течения двухфазного гелия при давлении $1,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Подсистема питания работала в режиме стабилизации мощности. Форма импульса — трапецеидальная, фронт — около 20 мкс.

Полученные результаты представлены на рис. 6 в виде зависимостей перегрева ΔT поверхности образца от времени t после подачи импульса мощности. Каждая кривая $\Delta T(t)$ представляет собой наложение двух кривых, одна из которых — результат измерений с интервалом стробирования 50 мкс, а другая — 200 мкс. Для получения равномерного шага по логарифмической оси времени соблюдается соотношение $\lg(N_{i+1}/N_i) = \text{const}$, где N_{i+1} , N_i — номера изображаемых точек. Совпадение кривых при разных интервалах стробирования свидетельствует о хорошей воспроизводимости результатов и качестве настройки обратной связи усилителя мощности и калибровки измерительного тракта. Анализируя рис. 6, можно выделить характерные режимы нестационарной теплопередачи и оценить различие в степени интенсивности процессов для верхней и нижней образующих образца, что объясняется расслоением потока гелия в охлаждающем канале.

Проведенные испытания показали работоспособность отдельных блоков и комплекса в целом. Созданная электронная система используется для моделирования тепловых режимов систем, криостатируемых нормальным и сверхтекучим гелием в условиях импульсного энерговыделения.

В заключение авторы выражают глубокую признательность В.Д.Инкину за помощь в работе и полезные обсуждения, Б.Г.Щинову, В.В.Мицыну, В.Е.Жильцову за полезные консультации при создании программного обеспечения, а также А.М.Пивень, Ю.И.Федотову и Г.В.Бекетовой за помощь в изготовлении электронных блоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Steward W.G. — *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 1978, v.21, No.7, p.863.
2. Джуарратано П. Дж., Стюард В. Дж. — *Теплопередача*, 1983, т.105, №2, с.129.
3. Schmidt C. — *Applied Physics Letters*, 1978, v.32, No.12, p.627.
4. Funaki K. — *Cryogenics*, 1985, v.25, No.3, p.139.
5. Lue T.W. et al. — *Adv. Cryog. Engng.*, 1978, v.23, p.226.
6. Green M.A. et al. — *Adv. Cryog. Engng.*, 1980, v.25, p.420.
7. Мамедов И.С. и др. — *Сообщение ОИЯИ П8-84-156*, Дубна, 1984.
8. Collier R.S. et al. — *Carbon Thin Film Thermometry, National Bureau of Standards (U.S.), NBSIR 74-355*, 1973.
9. Микляев В.М. и др. — *Труды XIII Международной конференции по ускорителям частиц высоких энергий*. Новосибирск: Наука, 1987, т.2, с.53.
10. Filippov Yu.P. et al. — *Proc. ICEC 12, Southampton, 1988, p.252, Batterworths*.
11. Инкин В.Д. и др. — *Сообщение ОИЯИ, 8-85-756*, Дубна, 1985.

12. МТТ-60. Модуль сопряжения с удаленным терминалом. Техническое описание. Катовице, 1981.
13. Антюхов В.А. и др. – Сообщение ОИЯИ, P10-85-922, Дубна, 1985.
14. САМ 5.01. Clock Pulse Generator. KFKI, Budapest, 1973.
15. САМ 5.08-1. SEQUENCE GENERATOR. KFKI, Budapest.
16. Антюхов В.А. и др. – Сообщение ОИЯИ 10-11636, Дубна, 1978.
17. Digital Multimeter, Models 181, Keithley Instruments, USA.
18. Калинин В.А. – Сообщение ОИЯИ, P10-87-57, Дубна, 1987.
19. Вьонг Дао Ви и др. – Сообщение ОИЯИ, 10-81-755, Дубна, 1981.
20. Журавлев Н.И. и др. – Сообщение ОИЯИ, 10-8754, Дубна, 1977.
21. Баяковский Ю.М. и др. – ГРАФОР. Графическое расширение фортрана. М.: Наука, 1985.

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д13-84-63	Труды XI Международного симпозиума по ядерной электронике. Братислава, Чехословакия, 1983.	4 р. 50 к.
Д2-84-366	Труды 7 Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1984.	4 р. 30 к.
Д1,2-84-599	Труды VII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1984.	5 р. 50 к.
Д17-84-850	Труды III Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1984. (2 тома)	7 р. 75 к.
Д11-85-791	Труды Международного совещания по аналитическим вычислениям на ЭВМ и их применению в теоретической физике. Дубна, 1985.	4 р. 00 к.
Д13-85-793	Труды XII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1985.	4 р. 80 к.
Д4-85-851	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1985.	3 р. 75 к.
Д3,4,17-86-747	Труды V Международной школы по нейтронной физике Алушта, 1986.	4 р. 50 к.
—	Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1984. (2 тома)	13 р. 50 к.
Д1,2-86-668	Труды VIII Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1986. (2 тома)	7 р. 35 к.
Д9-87-105	Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1986. (2 тома)	13 р. 45 к.
Д7-87-68	Труды Международной школы-семинара по физике тяжелых ионов. Дубна, 1986.	7 р. 10 к.
Д2-87-123	Труды Совещания "Ренормгруппа - 86". Дубна, 1986.	4 р. 45 к.
Д4-87-692	Труды Международного совещания по теории малочастичных и кварк-адронных систем. Дубна, 1987.	4 р. 30 к.
Д2-87-798	Труды VIII Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1987.	3 р. 55 к.
Д14-87-799	Труды II Международного симпозиума по проблемам взаимодействия мюонов и пионов с веществом. Дубна, 1987.	4 р. 20 к.
Д17-88-95	Труды IV Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1987.	5 р. 20 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу: 101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79. Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований.

Рукопись поступила в издательский отдел
28 декабря 1988 года.