

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Препринт КИЯИ-86-1

КиҮі -- 86-1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОТРОНА У-240  
В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТ  
МИКРО-ЭВМ

УДК 681.3.06

А.Ф.Линев, В.А.Пашин, В.И.Сахно, Н.А.Соколова

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОТРОНА У-24  
В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТ  
МИКРО-ЭВМ

Приведены результаты испытания модуля управления разработанного для АСУ циклотроном. Показаны условия устойчивости системы управления с ЭВМ в контуре обратной связи при управлении многообмоточным магнитом циклотрона. Исследованы требования к совершенствованию источников силового питания У-240.

A.F.Linev, V.A.Pashin, V.I.Sakhno, N.A.Sokolova

An Investigation of Characteristics of U-240 Cyclotron in Regime of Automatic Control by Micro-Computer

The test results of control module, developed for cyclotron automatic control system are presented. The conditions of stability (ACS) of the control system with a computer in feedback circuit under multiwinding cyclotron magnet control are shown. The requirements for improvement of U-240 power supply are studied.

АКАДЕМИЯ НАУК УССР

А.Ф.Линев, В.А.Пашин, В.И.Сахно, Н.А.Соколова

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОТРОНА У-240  
В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТ  
МИКРО-ЭВМ

Киев - 1986

Ключевые слова:

циклотрон У-240, микро-ЭВМ, система управления на линии с ЭВМ, система человек-машина, эксплуатация, стабильность, электромагниты;

**Kiev cyclotron, microprocessors on-line control systems, man-machine systems, operation, stability, electromagnets.**

В июне 1984 года на циклотроне У-240 была проведена опытная эксплуатация автономной системы автоматизированного управления силовым питанием корректирующих обмоток циклотрона и элементов магнитных линз тракта транспортировки. Эти работы являлись завершающим этапом в создании типового модуля автоматизированной системы управления ускорителями (АСУ). В создании АСУ принята идеология компоновки иерархической структуры системы из типовых модулей, каждый из которых рассчитан на автоматическое управление 32 параметрами ускорителя, объединенных по общности воздействия на пучок или по особенностям эксплуатации. Такой модуль ранее был описан в /1,2/. Он базируется на микро-ЭВМ "Электроника-60", наборе устройств связи ее с объектом, оператором и малой ЭВМ верхних уровней. Испытания преследовали три основные цели.

1. Проверить во время непрерывной эксплуатации на циклотроне характеристики модуля и оценить заложенные в нем технические решения.

2. Исследовать переходные характеристики в авторегуляторах технологических систем циклотрона при включении общего контура управления с ЭВМ.

3. Ознакомить персонал циклотрона с особенностями управления ускорителем через ЭВМ, экспериментально проверить алгоритмы и программы управления.

Первая из поставленных задач необходима для решения вопросов широкого применения модуля и является обязательным условием разработки любого устройства. Испытания проводились на протяжении типового рабочего цикла циклотрона У-240 не менее 200 ч непрерывной работы в нескольких режимах ускорения. При этом важно было одновременно определить и устойчивость работы модуля в условиях сетевых помех, имеющих место на циклотроне от мощного тиратронного выпрямителя генератора ВЧ (более 400 кВт), источников силового питания с тиристорными преобразователями магнита СП 037 (около 100 кВт).

Вторая задача предусматривает определение технических требований на модернизацию технологических систем циклотрона (в первую очередь источников силового стабилизированного питания) в плане не только улучшения их эксплуатационных характеристик, но и для создания предпосылок автоматизации управления. Такая модернизация предусматривается планами работ циклотрона на ближайшее время в связи с тем, что большинство технологических систем ускорителя разрабатывалась в 60-х годах и, следовательно, изнашивались физичес-

ки и морально. Несмотря на то, что в 70-х годах часть систем при запуске циклотрона была модернизирована, к настоящему времени они уже не соответствуют современным требованиям процессов при регулировании взаимосвязанных параметров (например, в контурах регулирования тока многообмоточного магнита циклотрона). Условием устойчивости такой многосвязной системы, полученным при аналитическом решении уравнений контуров, является оптимальный выбор постоянного времени контуров регулирования (стабилизации). Физически это означает ограничения в допустимой скорости изменения тока в обмотках магнита. Этот фактор определяет степень взаимосвязи между отдельными контурами, поэтому предельно допустимую скорость регулирования тока в обмотках предполагалось определить экспериментально при испытании модуля на циклотроне.

Исследования подтвердили обоснованность таких опасений. Было выяснено, что устойчивость контура управления с микро-ЭВМ требует выполнения ряда условий. Первое условие определяет требования к стабильности регулируемых параметров. Вследствие запаздывания контура с ЭВМ (при быстродействии измерительных цепей модуля 0,5 с и цикличности измерений 8 с) нестабильность регулируемого параметра более 2 младших значащих разрядов АЦП в течение цикла измерения приводит к возникновению колебательного процесса с периодом 8 и более секунд. Такие требования справедливы и в диапазоне быстрых возмущений вплоть до 8 Гц.

Это вызвано тем, что совпадение даже быстрых возмущений с моментом измерения вызывает ложную реакцию системы управления, в конечном итоге ведущей к увеличению длительности переходного процесса или к возникновению автоколебания системы. Второе условие определяет допуски на быстроедействие регулирования тока. Здесь необходимо выбрать скорость регулирования, не превышающую те же 2 значащих разряда на один цикл измерения, но при котором одновременно незначительны и сами переходные процессы в автономных контурах стабилизации тока источников питания обмоток.

В процессе наладки путем регулировки исполнительных устройств (БРУ), через которые ЭВМ воздействует на соответствующие источники питания, а также отладки программного обеспечения было выяснено, что для выполнения условий устойчивости контура с микро-ЭВМ изменение тока в обмотках не должно превышать примерно 3 А/с (с небольшими отличиями в разных контурах), как по нарастанию, так и по спаду тока. Вторым условием устойчивости является стабилизация регулируемых параметров с точностью не хуже  $2 \cdot 10^{-4}$  (для данного модуля). Можно отметить, что для модулей с точностью регулирования  $3 \cdot 10^{-5}$  эти требования соответственно возрастут до величины  $2 \cdot 10^{-5}$ .

Полученные данные позволяют определить требования к источникам питания циклотрона при их модернизации, а именно: для тракта транспортировки (магнитные линзы и корректирующие магниты) стабильность тока не хуже  $2 \cdot 10^{-4}$ , для

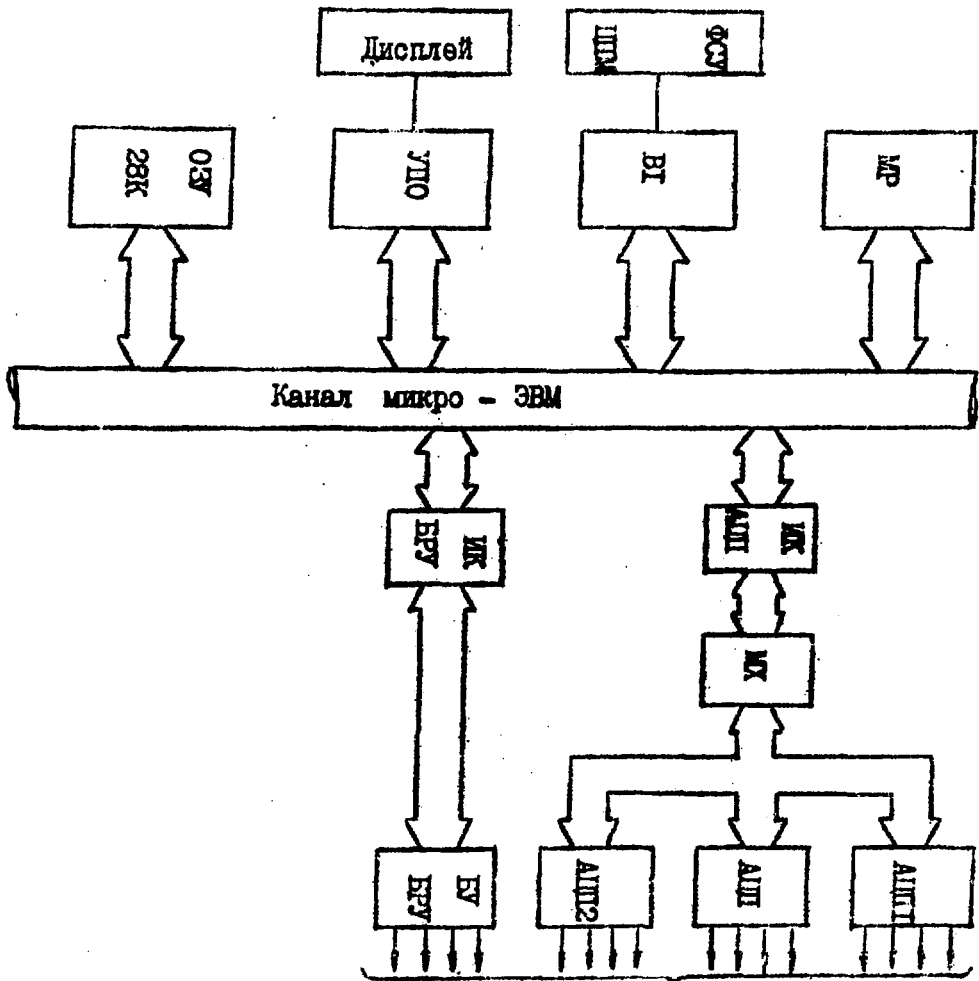


концентрических обмоток на периферии магнита циклотрона стабильность тока не хуже  $3 \cdot 10^{-5}$ .

Поэтому в состав комплекса технологических систем был включен новый модернизированный источник силового питания мощностью 25 кВт, разработанный под научным руководством отдела физики ускорителей в СКТБ ИЯИ и предназначенный для питания основной обмотки магнитной линзы.

Важность третьей задачи определяется необходимостью преодоления психологического барьера, связанного с перестройкой "операторского мышления". Как показывает практика создания АСУ на других объектах, этот процесс неизбежен, поскольку оператору приходится общаться уже не с пассивным устройством, а с системой, обладающей определенным интеллектом. Здесь необходимо выявить способы диалога с системой, создающие минимум трудностей оператору. В этом смысле важно оптимизировать количество подпрограммы, построение директив, вопросов, ответов, способа документирования событий и др. С этой целью для модуля были созданы математические программы, которые можно вызывать простыми операциями, а функции программ соответствуют привычному для оператора способу управления циклотроном.

На данном этапе структура модуля была приведена к виду, показанному на рисунке. Исключены цепи автоматической калибровки (они есть на самих АЦП), цепи связи с контрольно-диагностической установкой (проверка дискретных уровней состояния технологических систем, КДУ) и контуры управле-



Структура модуля управления

МР - микропроцессор М2, В1 - блок связи с устройствами ввода/вывода, МХ - мультиплексор, УПО - устройство последовательного обмена, ОЗУ - оперативное запоминающее устройство, ИК АЦП - блок связи с АЦП, ИК БРУ - блок связи с БРУ (регулирование уставок), БУ БРУ - блок управления с 32 БРУ

ния через ЦАП. Это связано с тем, что в настоящее время устройства КДУ используются в автономном режиме как цепи защиты и включены непосредственно в сами источники силового питания, а имеющиеся на циклотроне источники питания работают с трехпозиционным регулированием ("больше", "меньше", "форсаж") через блоки регулирования установок (БРУ).

Такие изменения позволили значительно упростить алгоритмы работы модуля, сохранив при этом его основные функции как универсальной системы автоматического управления 32 параметрами циклотрона. Одновременно наличие в контурах управления блоков БРУ с электроприводом (почти идеальных интегрирующих звеньев) обеспечивало системе высокий астатизм. Благодаря этому обеспечивается устойчивость всей многосвязной системы стабилизированных источников тока многообмоточного магнита циклотрона при наличии запаздывания в групповом контуре управления с ЭВМ.

Для работы в качестве автономной системы управления микро-ЭВМ модуля оснащена цифropечатающим устройством *KONSUL* -256 (*DZM-160*), фотосчитывающим устройством *FS* -1501, перфоратором ПЛ-150 М, дисплеем "Электроника 15-ИЭ-00-013", объем ОЗУ расширен до 28 К слов платами П2 и П3. Во время испытаний модуль был установлен в зале стоек стабилизации на минимальном удалении от измерительных цепей и исполнительных устройств. В качестве пульта использовался дисплей, удаленный на рас-

стояние более 45 метров в помещение центрального пульта управления циклотроном и расположенный на рабочем месте оператора. В качестве наладочного был предусмотрен дисплей "Символ-И", расположенный непосредственно у стойки модуля.

На начальном этапе освоения модуля принята перфоленточная система ввода программ.

При работе модуля в качестве автономной системы управления использовалось математическое обеспечение, разработанное Н.А.Соколовой. Программа обеспечивает управление параметрами циклотрона по предварительно рассчитанным уставкам и в соответствии с технологическими особенностями эксплуатации источников питания. Модуль автоматически производит первоначальный сброс в нуль уставки систем автоматического регулирования тока источников питания, имеет возможность ввода таблицы расчетных параметров, редактирования этой таблицы перед началом и в процессе работы, автоматически регулирует параметры (токи и напряжения) для достижения заданных уровней и стабилизацию этих уровней в процессе работы циклотрона. Кроме того, модуль может работать в режиме информационной системы, при этом значения всех контролируемых параметров отображаются на экране дисплея, листингах или выводятся на перфоленту для создания библиотеки отлаженных режимов работы ускорителя.

Модуль был подключен к 21 источнику силового питания обмоток магнита циклотрона, линз, поворотных магнитов арка транспорта к генератору ВЧ в соответствии

с адресами, приведенными в табл.1.

Звездочками отмечены параметры, для которых имелась возможность автоматического регулирования, остальные только измерялись. К 7 каналу модуля постоянно был подключен новый источник питания. Это устройство является рабочим образцом устройства, предназначенного для замены ныне работающих источников питания с электромашинными преобразовательными агрегатами. Новый источник, именуемый ИССП 330/80, рассчитан на работу в составе системы автоматического управления циклотроном. Он обеспечивает стабильность тока в нагрузке не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$ , оснащен задающим устройством на основе ЦАП с "шаговым" режимом регулирования. Данные о стабильности остальных источников силового питания на момент испытания модуля приведены в табл.2.

В этих работах принципиально важно было исследовать устойчивость многопараметрической системы с управлением от ЭВМ, определяемой переходными процессами в различных контурах. Ранее аналитическое исследование уравнений в контурах такой системы давало основание опасаться возникновения колебательных процессов.

Наиболее продолжительное время модуль испытывался в режиме автоматизированной измерительной системы, поскольку в процессе текущей эксплуатации циклотрона не всегда имелась возможность подачи управляющих воздействий без влияния на параметры пучка. Поэтому под постоянным управлением ЭВМ находился только модернизированный источник

питания основной обмотки линзы ЛЗ (ИССП 330/80). На остальные параметры контуры управления замыкались только во время исследования устойчивости системы в течение около 16 ч. (табл.3).

Было показано, что при выполнении ранее приведенных условий устойчивости, в режиме автоматического управления от ЭВМ, заданный оператором режим работы циклотрона устанавливается не более чем на 12 мин. независимо от количества регулируемых параметров, что в несколько раз быстрее, чем при ручном управлении. Большинство операторов в течение 1-2 рабочих смен осваивали пользование системой, а при более продолжительной работе (примерно 4-5 смен) работа с модулем доходит до автоматизма.

В процессе опытной эксплуатации были внесены изменения в рабочие программы, позволившие создавать перфокарточный архив отлаженных режимов циклотрона. Выявлены дополнительные требования, которые полезно внести в программы, для повышения удобства работы оператора (отображение информации по группам параметров, подача звуковых сигналов при недопустимых уходах регулируемых параметров в случаях отказов систем авторегулирования источников питания или иных технологических систем. Был уточнен вид документа, выдаваемого печатающим устройством ЭВМ (см.табл.4 - момент начального запуска при работе модуля в режиме измерительной системы).

Эксплуатация модуля в составе циклотрона позволяет

сделать ряд выводов, касающихся направления совершенствования самого модуля, модернизации источников силового питания циклотрона и других его элементов (датчиков, исполнительных устройств), а также направления работ по автоматизации.

1. Источники силового питания обмоток циклотрона и некоторых элементов тракта необходимо модернизировать для получения долговременной стабильности не хуже  $8 \cdot 10^{-5}$  (корректирующих обмоток циклотрона), линз и корректирующих магнитов, генератора ВЧ не хуже  $2 \cdot 10^{-4}$ ,  $2 \cdot 10^{-5}$  для основной обмотки магнита циклотрона, поворотных магнитов и периферийных концентрических обмоток.

2. Цели управления циклотроном (исполнительные устройства) могут использоваться с трехпозиционным управлением, что благоприятно для статического объекта с точки зрения устойчивости системы с ЭВМ в контуре управления.

3. Предложенный модуль является эффективным средством улучшения физических и эксплуатационных характеристик циклотрона. Для создания АСУ циклотрона У-240 необходимо минимум 4 таких модуля, отдельно для циклотрона, тракта транспортировки, монохроматора и измерения параметров пучка. Кроме того, необходимо решить вопрос автоматизации обработки технологических параметров, определяющих состояние оборудования ускорителя.

4. Необходимы серьезные работы в области программирования, в частности, для разработки математического обес-

печения иерархической АСУ на базе комплекса ЭВМ.

Для эффективного использования опыта проведенной работы и дальнейшего развития систем управления ускорителями и имеющегося уже сейчас программного обеспечения желательно уже на нынешнем этапе использовать малую ЭВМ с полным набором периферийных устройств, в том числе регистрирующей аппаратуры и цветных дисплеев, для моделирования иерархической структуры АСУ. Необходимо разработать мнемосхемы, отображающие на экранах цветных телевизоров информацию о пучке (используя хотя бы имеющееся на циклотроне диагностическое оборудование), более полно и оперативно отображать текущее состояние комплекса технологического оборудования циклотрона.



Таблица 1

## Распределение каналов модуля управления

| № (адрес): | Имя параметров      | Измерение: | Управление           |
|------------|---------------------|------------|----------------------|
| 01         | Ток осн.обм. ЕО     |            |                      |
| 02         | Ток дип.обм. МО     | постоянно  |                      |
| 03         | Ток кор.обм. К-3    | -"-        | экспериментально     |
| 04         | Ток кор.обм. К-11   | -"-        | -"-                  |
| 05         | Ток обм. линзы Л-4А | -"-        |                      |
| 06         | -"-                 | Л-1Б       |                      |
| 07         | -"-                 | Л-3А*      | постоянно постоянно  |
| 10         | -"-                 | Л-4Б       |                      |
| 11         | Ток кор.обм. К-10   | -"-        | экспериментально     |
| 12         | -"-                 | К-2        | -"- -"-              |
| 13         | Ток пов.магн. ПМ 3  | -"-        |                      |
| 14         | Ток кор.обм. К-10   | -"-        | экспериментально     |
| 15         | -"-                 | К-12       | -"- -"-              |
| 16         | Ток ом.линзы Л-1А   |            |                      |
| 17         | Ток пов.магн. ПМ-1  | постоянно  |                      |
| 20         | Ток обм. линзы Л-5А | -"-        |                      |
| 21         | Ток кор. обм. МО    | -"-        |                      |
| 22         | -"-                 | ТК         | -"-                  |
| 23         | -"-                 | К5         | -"- экспериментально |
| 24         | Скважность ГВЧ      |            |                      |
| 25         | Ток кор. обм. К-9   | постоянно  | экспериментально     |

| 1  | 2                                   | 3         | 4                |
|----|-------------------------------------|-----------|------------------|
| 26 | Ток в правой ветви Г1               | постоянно |                  |
| 27 | Ток левой ветви Г1                  | —"        |                  |
| 30 | Ток пучка в 4 КР                    |           |                  |
| 31 | Напр. на дуанте                     |           |                  |
| 32 | Ток осн. обм. ТК                    | постоянно |                  |
| 33 | Ток кор. обм. К-4                   | —"        | экспериментально |
| 34 | —" К-6                              | —"        | —"               |
| 35 | —" К-8                              | —"        | —"               |
| 36 | Ток правой ветви Г3                 | —"        |                  |
| 37 | Ток левой ветви Г3                  | —"        |                  |
| 40 | Признак режима работы<br>циклотрона |           |                  |

Таблица 2

Характеристики источников питания циклотрона на  
момент испытания модуля управления

| Параметр       | : Стабильность    | : Регулирование |
|----------------|-------------------|-----------------|
| К-1, К-3, К-4  | $2 \cdot 10^{-3}$ | Трехпозиционное |
| К-2, ТК-00     | $2 \cdot 10^{-2}$ | —"              |
| К-8, К-9, К-10 | $1 \cdot 10^{-3}$ | —"              |
| К-11, К-12     | $8 \cdot 10^{-4}$ | —"              |
| К-5, КО-ТК     | $3 \cdot 10^{-3}$ | —"              |

| 1           | : | 2                 | : | 3                              |
|-------------|---|-------------------|---|--------------------------------|
| ГО-1        |   | $5 \cdot 10^{-4}$ |   | Трехпозиционное                |
| ИССП-330/80 |   | $5 \cdot 10^{-5}$ |   | Трехпозиционное, шаговый режим |
| ПМ-1        |   | $1 \cdot 10^{-4}$ |   | -"- -"- -"                     |
| ПМ-2        |   | $3 \cdot 10^{-4}$ |   | -"- -"- -"                     |
| Л-1, Л-5    |   | $1 \cdot 10^{-4}$ |   | -"- -"- -"                     |

Таблица 3

Распределение функций модуля во время испытаний, %

| Суммарная<br>наработка | Наладочные<br>работы | Непрерыв-<br>ная<br>эксплуата-<br>ция | Время<br>работы<br>ИИС | Время с ИССП<br>работы<br>САУ | (Л-3) |
|------------------------|----------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------------------|-------|
| 300                    | 60                   | 240                                   | 224                    | 16                            | 80    |

Таблица 4

Вид документа, представляемого модулем

| АДРЕС | ИМЯ       | УСТАВКА(В) | ДОП.ОТКЛ.(В) | ТЕКУЩ.ЗН.(В) | ОТКЛ.(8) |
|-------|-----------|------------|--------------|--------------|----------|
| 01    | ЕО-002    | +1,6231    | +0,0002      | +0,0130      | +1,6101  |
| 02    | МО-ДО     | +3,0000    | +0,0020      | +0,0060      | +2,9940  |
| 03    | К-3 / - / | +0,2740    | +0,0050      | +0,0120      | +0,2620  |
| 04    | К11/14    | +1,7090    | +0,0050      | -0,0560      | +1,7650  |
| 05    | Л-4А      | +0,8430    | +0,0050      | +0,0260      | +0,8170  |
| 06    | Л-1Б      | +0,8510    | +0,0050      | -0,0000      | +0,8510  |
| 07    | Л-3       | +2,0000    | +0,0030      | -0,0050      | +2,0050  |
| 10    | Л-4Б      | +0,7730    | +0,0050      | +0,0040      | +0,7690  |
| 11    | К-1       | +0,4450    | +0,0050      | +0,0060      | +0,4390  |

## Литература

1. В.И.Сахно. Информационно-измерительная система АСУ  
изохронным циклотроном.-В кн.: Ускорители ионов низких  
и средних энергий. Тр.Всесоюзного совещания. - Киев,  
"Наукова думка", 1982, с.119

Рукопись поступила в редакционную

группу ИЯИ 22.05.85 г.

Окончательный вариант 26.12.85 г.

Александр Федорович Линеv,  
Владлен Андреевич Пашин,  
Виктор Иванович Сахно,  
Надежда Андреевна Соколова

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОТРОНА У-240  
В РЕЖИМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОТ  
МИКРО-ЭВМ  
(Препринт КИЯИ-86-1)

Редакторы: Солдатенко Н.А.  
Малашкина Л.П.

Подписано к печати 27.П.86 г.

БФ 28298 Бумага офсетная Усл.-печ.л. - 0,81

Изд. № КИЯИ-86-1 Печать офсетная Уч.-изд. л. - 0,48

Тип.заказ 154 Формат бумаги 60x90/16

Тираж 200 экз. Цена 3 коп.

---

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований АН УССР  
252650, Киев-28, проспект Науки, 119

---