

Ордена Ленина

Институт атомной энергии

им. И. В. Курчатова

5112203749

В.Г. Григорьян, Д.А. Латышев, В.А. Обухов,
А.А. Панасенков, Н.Н. Семашко

ИАЭ-3408/7

ПОТОКИ ВТОРИЧНЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
В МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ
ИОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Москва 1981

РУБРИКАТОР ПРЕПРИНТОВ ИАЭ

1. Общая теоретическая и математическая физика
2. Ядерная физика

3. Общие проблемы ядерной энергетики
4. Физика и техника ядерных реакторов
5. Методы и программы расчета ядерных реакторов

6. Теоретическая физика плазмы
7. Экспериментальная физика плазмы и управляемый термоядерный синтез
8. Проблемы термоядерного реактора

9. Физика конденсированного состояния вещества
10. Физика низких температур и техническая сверхпроводимость
11. Радиационная физика твердого тела и радиационное материаловедение

12. Атомная и молекулярная физика
13. Химия и химическая технология

14. Приборы и техника эксперимента
15. Автоматизация и методы обработки экспериментальных данных
16. Вычислительная математика и техника

Индекс рубрики дается через дробь после основного номера ИАЭ.

В в е д е н и е

При решении проблемы управляемого термоядерного синтеза одной из важнейших задач является создание эффективных инжекторов мощных потоков атомов водорода (дейтерия), предназначенных для нагрева плазмы до термоядерных температур.

Главным элементом, определяющим основные параметры инжектора, является плазменный ионный источник, и весьма актуальным становится вопрос о разработке ионно-оптической системы (ИОС) источника, обеспечивающей получение стационарных пучков ионов водорода с плотностью тока на эмиссионной границе плазмы $0,2 - 0,5$ А/см² при энергиях от ~ 40 до $150 - 200$ кэВ.

При указанных плотностях ионного тока формирование пучков с углом расходимости менее $\pm 2^\circ$ при увеличении энергии свыше ~ 60 кэВ требует перехода от трехэлектродных ИОС к многоэлектродным с несколькими ступенями ускорения ионов вследствие нелинейной связи предельного напряжения на ускоряющем промежутке с длиной промежутка.

Существенное влияние на работоспособность ИОС оказывают потоки вторичных заряженных частиц, образующихся в ее объеме, на электродах и в камере перезарядки ионного пучка. Эти потоки несут большую энергию на электроды ИОС [1], что при длительности импульсов свыше 1 с требует разработки ИОС с охлаждаемыми электродами [2].

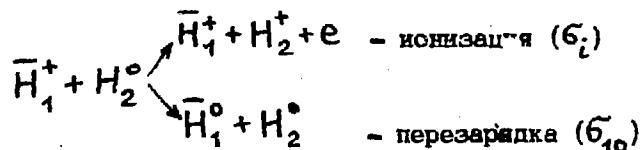
В работе [1] проводилось моделирование потоков вторичных частиц в ячейке многоселевой трехэлектродной ИОС, рассчитанной для получения пучка ионов водорода с энергией 40 кэВ, и определялись удельные мощности, выделяющиеся на электродах в зависимости от геометрии ИОС и распределения потенциалов на электродах.

В данной работе изучается многэлектродная ИОС на 160 кэВ. Главное внимание уделено оптимизации ИОС по геометрии и распределению потенциалов с целью уменьшения энерговыделения на электродах.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РАСЧЕТА

Для заданной геометрии ячейки ИОС с помощью моделирования на электролитической ванне определялись границы униполярного пучка протонов, извлекаемых из газоразрядной плазмы, траектории вторичных частиц, родившихся в объеме ИОС и на электродах [1].

Предполагалось, что данная ИОС может устанавливаться в источник без внешнего магнитного поля ИЕМ [3]. Поскольку газовая эффективность источника $\sim 30\%$, а давление в разрядной камере ~ 1 Па, что соответствует концентрации нейтралей $4 \cdot 10^{14}$ $1/\text{см}^3$, то в объем ИОС будет постоянно поступать некоторый поток молекулярного водорода. Считалось, что концентрация нейтралей в каждом каскаде не меняется, а на выходе из ИОС она составляет величину 10^{14} $1/\text{см}^3$ (рис. 1). В объеме пучка рассматривались только реакции



Соответствующие сечения взаимодействия брались из [4]. В расчетах учитывались:

- потоки вторичных ионов, родившиеся в объеме ИОС;
- поток ионов из вторичной плазмы перезарядной камеры;

— потоки электронов, возникающих на электродах в результате ион-электронной эмиссии.

Ток вторичных ионов из элементарного объема ячейки ИОС $\Delta Q = \Delta x \cdot \Delta y \cdot 1$ определяется

$$\Delta J_i = (\sigma_i + \sigma_{i0}) n_0 j \Delta Q,$$

где x — направление, параллельное, а y — перпендикулярное плоскости симметрии ячейки ИОС; n_0 — концентрация молекул водорода; j — плотность тока первичного пучка. Поток ионов из вторичной плазмы на электрод, находящийся под отрицательным потенциалом, представляет собой ионный ток насыщения, отбираемый с поверхности обратного мениска [1].

Мощность, выделяющаяся на электроде при выпадении на него элементарного тока ΔJ , определяется

$$\Delta N = \Delta J \cdot \Delta U,$$

где ΔU — разность потенциалов между точками рождения и выпадения частиц.

Коэффициент ион-электронной эмиссии брался из [5]. Первоначально рассматривалась система на 160 кВ, геометрия и распределение потенциалов в которой представлены на рис. 1. Первый каскад ИОС предназначен для получения пучка протонов с энергией 60 кэВ и плотностью тока $\sim 0,3 \text{ А/см}^2$, остальные каскады, кроме последнего, осуществляют доускорение ионов и формирование пучка.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ

На рис. 2 представлена картина распределения электрического поля в ИОС и границы ускоряемого пучка. Полученная конфигурация электрического поля неблагоприятна с точки зрения распределения потоков вторичных частиц по электродам ИОС. На рис. 3 приведены характерные траектории вторичных ионов, которые образуются в объеме первого каскада и с энергией 100 — 150 кэВ выпадают на электроды 4, 5, 6. На рис. 4 показаны траектории электронов, воз-

никающих при взаимодействии ионов с поверхностью электродов. Энергия, с которой электроны выпадают на электроды, также велика (80 - 100 кэВ).

Как было показано в [1], изменяя потенциал отрицательного электрода, можно изменять форму границы вторичной плазмы, добиваясь того, что ионы с нее попадают в такую часть поверхности этого электрода, откуда вторичные электроны ускоряются в направлении выходного электрода, но не в сторону эмиссионного электрода.

Результаты расчетов представлены в табл. 1, в которой указаны величины токов и мощностей, приходящихся на единицу длины электрода, и процент мощности, выделяемой на электродах, по отношению к мощности пучка. Следует отметить, что энерговыделение по периметру электрода носит крайне неравномерный характер, так как вторичные потоки выпадают на 10 - 20% поверхности электродов. Это может создать дополнительные трудности при обеспечении работоспособности электродов в стационарном режиме.

Наиболее значительный вклад в энергобаланс вносят ионы, образовавшиеся в объеме пучка на первом каскаде, где интенсивность их образования особенно велика из-за высокой концентрации нейтральных молекул и максимального значения сечения взаимодействия ионов пучка с ними.

Ток вторичных ионов из этой области на единицу длины шестого электрода - 4,6 мА/см, а мощность ~ 600 Вт/см. При взаимодействии вторичных ионов из этой области с поверхностью четвертого электрода на единице его длины возникает ток ион-электронной эмиссии 12 мА/см, что приводит к энерговыделению на единице длины второго электрода 960 Вт/см.

Таким образом, вторичные ионы из этой области обуславливают выделение почти половины мощности на электродах системы. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что существенное уменьшение тепловой нагрузки электродов может быть достигнуто

Таблица 1

| № электродов | Ионный ток | | Ток ионно-электронной эмиссии | | Электронный ток | | Выделяемая мощность | | |
|--------------|-----------------------|-------------|-------------------------------|------------------|-----------------|--------------|---------------------|---------------------|-----------------|
| | величина мА/см | источник | величина мА/см | источник | величина мА/см | источник | от ионов Вт/см | от электронов Вт/см | суммарная Вт/см |
| 1 | - | | | | 4,4 | 3-й электрод | - | 440 | 440 (1,5%) |
| 2 | - | | | | 12,2 | 4-й электрод | - | 976 | 976 (3,4%) |
| 3 | 1,6 (0,9%) | Из пучка | 4,4 | Ионы из пучка | - | - | 89 | - | 89 (0,31%) |
| 4 | 4,2 (2,3%) | То же | 12,2 | То же | 5,9 | 5-й электрод | 442 | 285 | 737 (2,6%) |
| 5 | 3 (1,7%) 12 (6,7%) | " Смешка | 6,4 9 | " Ионы смешка | - | - | 265 60 | - | 325 (1,1%) |
| 6 | 5,9 (3,3%) | Из пучка | | | 9,5 | 5-й электрод | 660 | 47 | 707 (2,5%) |

только в системах, где вторичные ионы из первого ускоряющего промежутка покидают ИОС, не взаимодействуя с электродами. Для этого необходимо подобрать соответствующее отношение напряженностей электрических полей на первом и втором каскадах, чтобы эквипотенциали в районе первого ускоряющего электрода образовывали достаточно сильную линзу, фокусирующую вторичные ионы в щель выходного электрода. В исходной системе (см. рис. 1) отношение E_2/E_1 равно 1,3, где E_k — напряженность поля между электродами в соответствующем промежутке. Как видно из рис. 5 — 7, при увеличении E_2/E_1 свыше 2,5 — 3 вторичные ионы начинают достаточно хорошо фокусироваться на выходную щель. Следует заметить, что в этих вариантах на величину E_2 пока не накладывалось ограничений, связанных с высоковольтной прочностью ускоряющего промежутка.

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И РАСЧЕТ УЛУЧШЕННЫХ СИСТЕМ

С учетом полученных результатов были выбраны параметры ИОС-2 (рис. 8), в которой $E_2/E_1 \approx 2,5$, причем напряженность поля между электродами во втором ускоряющем промежутке не превышает допустимой рабочей величины 100 кВ/см при полном напряжении 160 кВ. На рис. 9 изображены распределение потенциала в этой системе и конфигурация первичного пучка. Из рис. 10 видно, что вторичные ионы, образовавшиеся в объеме первого каскада, уходят из ИОС, не взаимодействуя с электродами. Это существенно сказалось на энергобалансе (табл. 2). Траектории вторично-эмиссионных электронов в этой системе приведены на рис. 11.

В результате изменения распределения электрических полей в системе мощность, выделяющаяся на электродах, уменьшается почти в четыре раза по сравнению с ИОС-1.

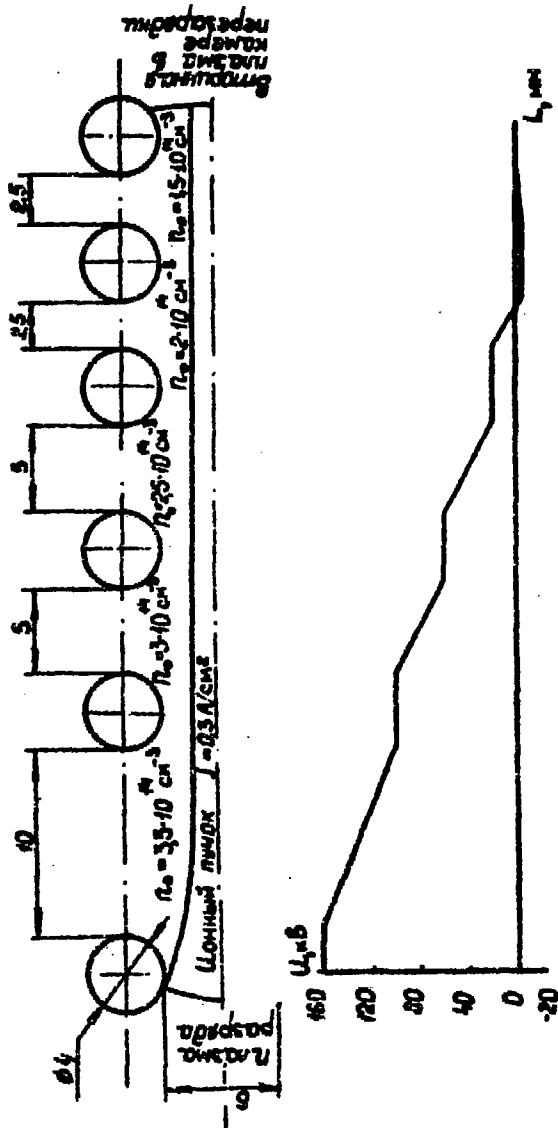


Рис. 1. Конфигурация ИОС-1

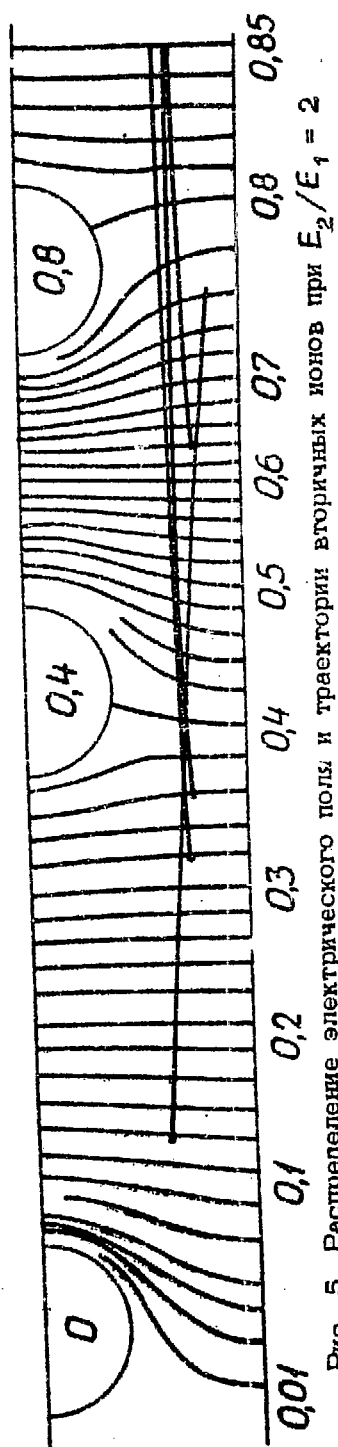


Рис. 5. Распределение электрического поля и траектории вторичных ионов при $E_2/E_1 = 2$

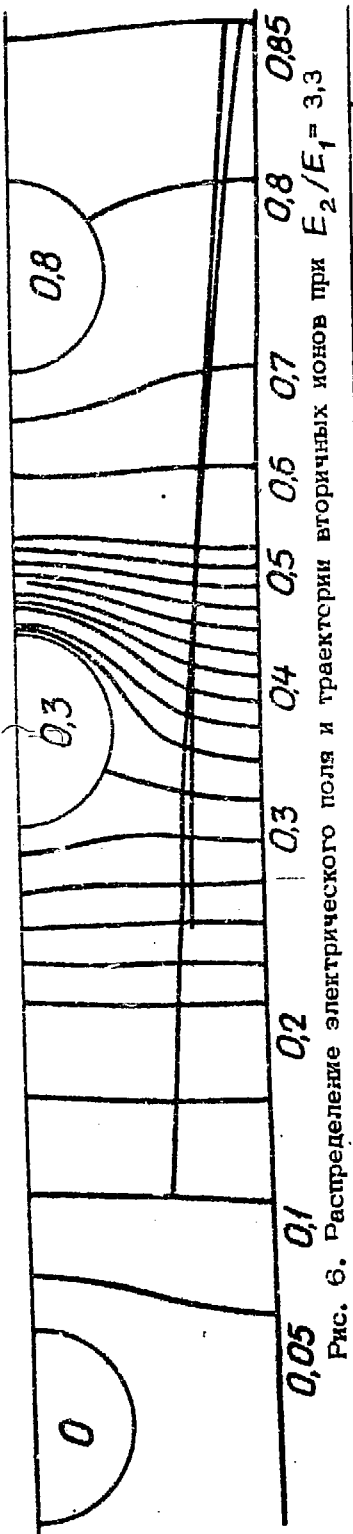


Рис. 6. Распределение электрического поля и траектории вторичных ионов при $E_2/E_1 = 3,3$

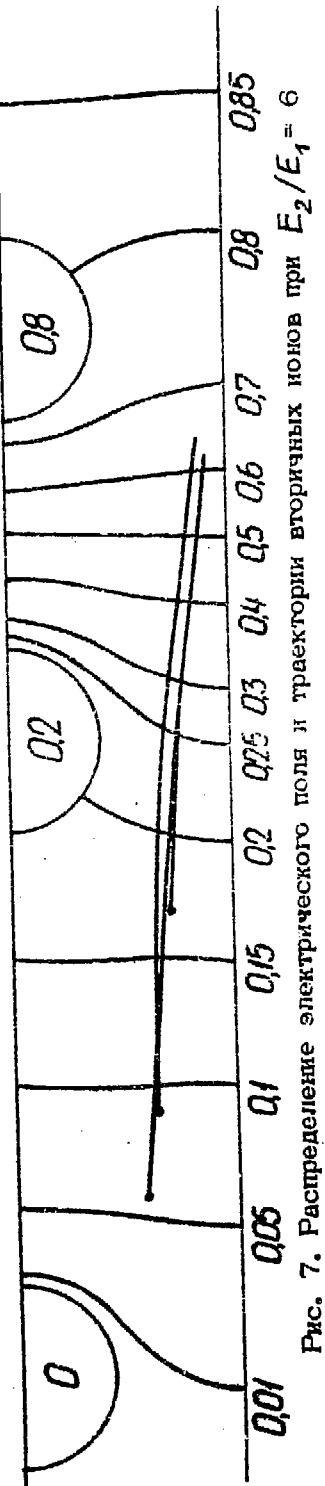


Рис. 7. Распределение электрического поля и траектории вторичных ионов при $E_2/E_1 = 6$

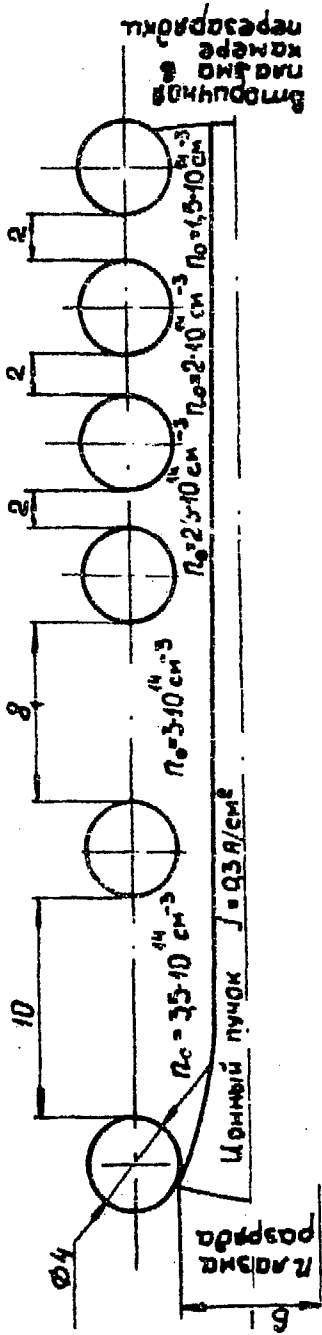


Рис. 8. Конфигурация ИОС-2

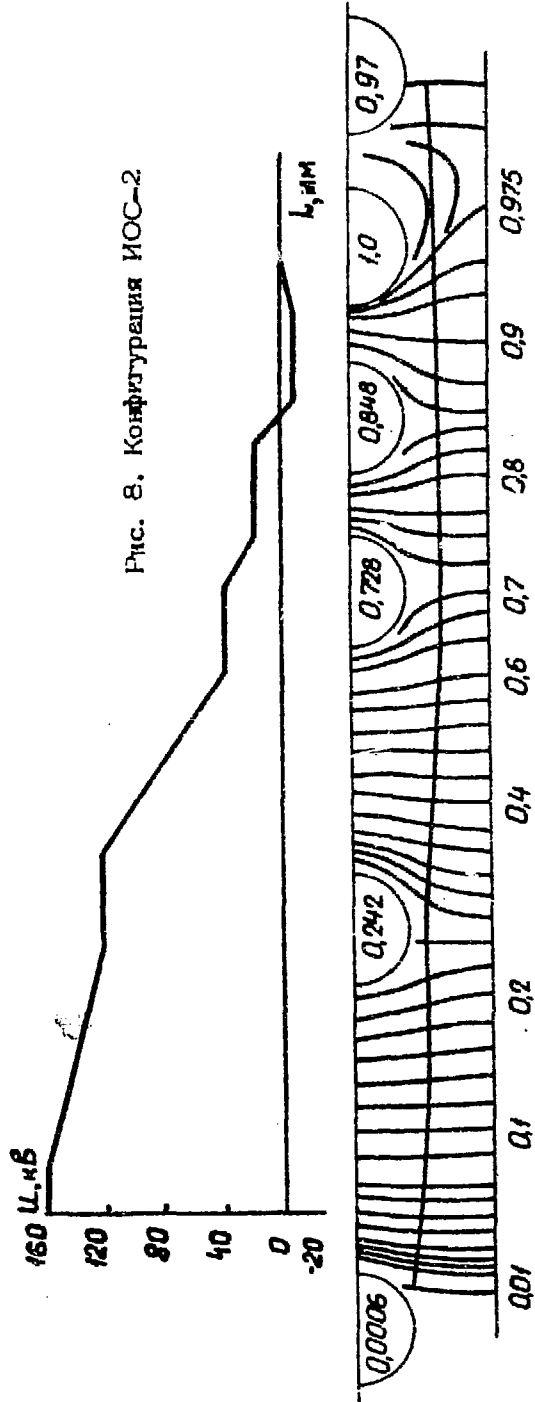


Рис. 9. Распределение потенциала в ИОС-2 и конфигурация ионного пучка

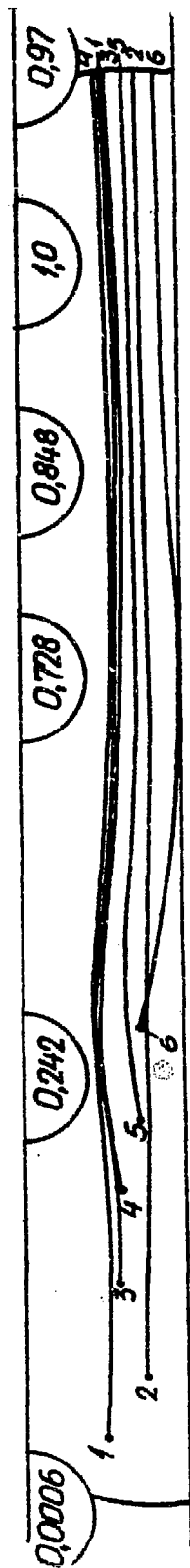


Рис. 10. Траектории вторичных ионов



Рис. 11. Траектории электронов вторичной эмиссии

Выводы

1. В многоэлектродных ИОС с последовательным ускорением возможно получение сформированных пучков протонов с энергией до 160 кэВ при эмиссионной плотности тока $\sim 0,3 \text{ A/cm}^2$.

2. Распределение потоков вторичных частиц по электродам ИОС и мощность, выделяющаяся на них, зависят от соотношения напряженностей электрического поля в каскадах. Увеличение отношения E_2/E_1 до 2,5 - 3 приводит к фокусировке вторичных ионов на щель в выходном электроде и к значительному снижению выделяющейся на электродах мощности.

3. Распределение энерговыделения по периметру перемычек в электродах оказывается существенно неравномерным, что должно приниматься во внимание при расчетах охлаждения их в стационарных режимах работы.

Список литературы

1. Григорьян В.Г. и др. Препринт ИАЭ-3024, 1978.
2. Semashko N.N. e.a. Proc. 8th Symp. on Enjin. Problems of Fusion Res. San Francisco, 1979, v.1, p.221.
3. Кулыгин В.М. и др. Препринт ИАЭ-2898, 1977.
4. Barnett C.F. e.a. Preprint ORNL-5206, 1977.
5. Дорожкин А.А. - В сб.: Труды ЛПИ, 1966, № 277, с. 105.

Редактор Л. И. Кирюхина

Технический редактор Н. А. Малькова

Корректор Г. Я. Кармадонова

Т-06821. 18.03.81. Формат 60x90/16. Уч.-изд. л. 0,7
Тираж 185. Цена 7 коп. Индекс 3624. Заказ 988

Отпечатано в ИАЭ

Препринт ИАЭ-3408/7. М., 1981