

M-523

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 11631

МЕРКУЛОВ
Лев Аркадьевич

ФОРМИРОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПОТОКА
В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ

(05.09.04 - электрофизические установки
и ускорители)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1978

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики
Объединённого института ядерных исследований.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник МАТОРА И.М.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник СЕМАШКО Н.Н.
кандидат технических наук
доцент БОНЧ-ОСМОЛОВСКИЙ А.Г.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва.

Защита диссертации состоится "6" сентября 1978 г. в
_____ часов на заседании специализированного Учёного совета
Д.047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединённого
института ядерных исследований.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.
Автореферат разослан "27" июня 1978 г.

Учёный секретарь
специализированного совета И.И.Лихачёв Лихачёв И.Ф.

Предметом изучения настоящей диссертации являются осесимметричные сильноточные электронные пучки, формирующие ламинарный поток электронов на выходе, предназначенные для инжекции электронов в линейный индукционный ускоритель ЛИУ-30/250 на ток $I = 250$ А в импульсе и энергию электронов $W = 30$ МэВ, сооружаемый в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ для импульсного реактора ИЕР-2.

Расчеты фокусировки ускоряемого в ЛИУ-30/250 пучка /I-4/ показали, что в случае ламинарности потока электронов, инжектируемых в ЛИУ, оказывается возможным полное устранение потерь электронов, следующих на рабочей части импульса, при ускорении.

Задача формирования ламинарного потока в мощных электронных пучках этого типа пока с достаточной полнотой не решена. Известные расчетные методы ещё не дают необходимой точности предсказания оптических параметров электронных пучков этого типа, обеспечивающих ламинарность пучка электронов на выходе. Поэтому не удивительно, что все опубликованные данные о величине измеренных эмиттансов пучка на выходе из действующих пучек, предназначенных для инжекции электронов в ЛИУ, показывают, что она даже не для всего тока на выходе из пучки, а лишь для 70-90% потока электронов оказывается не ниже $\sim 0,2 - 0,3$ см радиан. Вследствие этого потери электронов, следующих на "столике" ускоряющего импульса, во всех известных ЛИУ, как правило, составляют десятки процентов и лишь в одном случае - несколько процентов. Пучок ЛИУ-30/250 будет иметь на выходе среднюю мощность 200 кВт, и потери даже одного процента электронов в его ускорительном тракте недопустимы. Поэтому одной из основных проблем при разработке ускорителя явилось создание такой оптики электронной пучки, которая позволила бы получить на выходе из неё пучок, близкий к ламинарному.

Объединённый институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

Основная идея, позволившая достичь этой цели, заключалась в теоретическом отыскании и придании необходимой формы наиболее эффективному оптическому элементу пушки, а именно - эмиттирующей поверхности катода, с тем, чтобы обеспечивалась ламинарность потока на выходе /5-8/. Для её реализации необходимо было развить теорию и методику максимально точного расчета искомой формы эмиттера катода при неизменных, но подбираемых в каждом конкретном случае подходящих конфигурациях анода и остальной части катода, а также при фиксированном распределении фокусирующего осесимметричного магнитного поля и с учетом существенного влияния объемного заряда пучка.

Точные уравнения траекторий для релятивистского осесимметричного сильноточного ламинарного электронного пучка, данные в /6/, совместно с уравнениями Пуассона и Лапласа при известных граничных условиях явились основой алгоритма самосогласованного расчета, который выполняется по следующей схеме: ЭВМ после каждого пробного приближенного расчета радиального веера траекторий в пушке автоматически вводит коррективы в форму эмиттирующей поверхности катода, повторяет расчет с уточненной её формой и вводит следующие коррективы до тех пор, пока не будет достигнута такая окончательная форма эмиттирующей поверхности катода, которая обеспечивает на выходе из пушки ламинарный поток электронов.

Контур меридионального сечения эмиттера при расчете выражается в виде полинома

$$z = \sum_{i=1}^N a_i z_k^{i+1}, \quad (I)$$

где $i (1, \dots, N)$ - номер траекторий электронов.

Набор наиболее подходящих коэффициентов a_i является конечным продуктом расчета.

Все выполненные автором расчеты проводились таким образом, чтобы одновременно с необходимой ламинарностью потока обеспечивалась минимальная неоднородность напряженности электрического поля на поверхности эмиттера катода с учетом объемного заряда. Величину отношения

$$\gamma_{\text{min}} = \frac{E_{\text{max}}}{E_{\text{min}}} \quad (2)$$

на эмиттере катода в некоторых вариантах электронно-оптических схем, если специально ставилась такая задача, удалось снизить до 1,06+1,13.

При формировании ламинарного потока в электронных пушках в основном подбирались такие конфигурации их электродов, при которых напряженность электрического поля у поверхности эмиттера с учетом объемного заряда всюду велика и составляет десятки кВ/см при анодных напряжениях в сотни кВ. В этих условиях распределение плотности эмиссии от напряженности электрического поля на поверхности эмиттера должно подчиняться закону Шоттки. Показано также /7/, что как расчет по программе с учетом справедливости закона Шоттки, так и закона "3/2", приводят практически к одной и той же единственной форме эмиттера, приводящей к ламинарности потока, при фиксированных других оптических элементах пушки.

С помощью предложенной методики /6/ были рассчитаны шесть конкретных вариантов электронных пушек с ламинарным потоком на выходе для следующих наборов номинальных параметров /6-10/

(I_0 - ток, V_0 - напряжение, R_0 - радиус эмиттера, R'_0 - начальный наклон огибающей пучка, H_0 - магнитное фокусирующее поле в центре соленоида пушки, L - минимальное расстояние катод-анод):

1. $I_0 = 250$ А, $V_0 = 500$ кВ, $R_0 = 3,5$ см,
 $R'_0 = -0,001$, $H_0 = 474,3$ Э, $L = 5,5$ см,
закон Шоттки.
2. $I_0 = 250$ А, $V_0 = 500$ кВ, $R_0 = 2,5$ см,
 $R'_0 = -0,001$, $H_0 = 438,4$ Э, $L = 5,5$ см,
закон "3/2".
3. $I_0 = 250$ А, $V_0 = 300$ кВ, $R_0 = 3,5$ см,
 $R'_0 = -0,1$, $H_0 = 383,5$ Э, $L = 3$ см, закон
Шоттки.
4. $I_0 = 250$ А, $V_0 = 300$ кВ, $R_0 = 3,5$ см,
 $R'_0 = -0,001$, $H_0 = 251,4$ Э, $L = 3$ см, закон
Шоттки, сетка на аноде.
5. $I_0 = 250$ А, $V_c = 60$ кВ, $V_0 = 250$ кВ,
 $R_0 = 2,5$ см, $R'_0 = -0,001$, $L_{к-с} = 1$ см,
 $H_{max} = 300$ Э, закон Шоттки.
6. $I_0 = 250$ А, $V_0 = 500$ кВ, $R_0 = 4$ см,
 $R'_0 = -0,001$, $H_0 = 369,6$ Э, $L = 5,5$ см,
закон Шоттки.

Во всех случаях было проверено поведение характера потока при отклонении отдельных электромагнитных параметров от номинальных при сохранении остальных неизменными, а также поведение пучка на фронте и спаде импульса напряжения в случае справедливости закона Шоттки и закона "3/2" /6-10/.

Пушки 1) и 6) с диаметрами эмиттера 7 см и 8 см были реализованы коллективом сотрудников с участием автора и на них были проведены измерения параметров пучка /II/.

Результаты показали, что полученные кривые распределения плотности тока по сечению на выходе пушки на расстоянии 36 см от поверхности эмиттера при полученных значениях I и V свидетельствуют о хорошем согласии теории с экспериментом.

Показано, что это соответствие наблюдается в широком диапазоне изменений электромагнитных параметров. Измеренные поперечные размеры пучка во всех экспериментах совпадают с соответствующими расчетными результатами с точностью $9\% + 19\%$ для катода с диаметром эмиттера 7 см и с точностью $12\% + 24\%$ для катода с диаметром эмиттера 8 см. Оцененный во всех случаях эмиттанс с помощью исследования расходимости в отдельных точках сечения пучка струйки тока, проходящей сквозь отверстие в коллиматоре, близок к нулю.

Научная новизна работы заключается в том, что автором разработана новая и эффективная методика расчета сильноточных осесимметричных двухэлектродных и трехэлектродных электронных пушек, на выходе которых сформирован ламинарный поток. Автором рассчитаны шесть вариантов таких пушек.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанная в диссертации методика расчета, проверенная на двух вариантах экспериментальной электронной пушки ЭЭП-2, причем было продемонстрировано хорошее согласие эксперимента с расчетными данными и подтверждена правильность теории и расчетной методики, уже применена для расчета диодной и триодной пушек ЛИУ-30/250 и может быть эффективно использована как для формирования мощных ламинарных электронных осесимметричных пучков для инжек-

ции в другие линейные индукционные ускорители, так и для радиотехнических и других устройств.

Основные результаты диссертации опубликованы в 10 работах и докладывались на Всесоюзной конференции "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" (Томск, 1975 г.) и на IУ Всесоюзном семинаре по линейным ускорителям (Харьков, 1976 г.).

Диссертация состоит из введения, 4 глав основного текста, заключения и списка литературы и содержит 94 страницы основного текста с 48 рисунками на 24 страницах. Список литературы состоит из 50 наименований.

1. Во введении показано значение использования ламинарного пучка для инжекции электронов в линейный индукционный ускоритель (ЛИУ).

Рассмотрены известные до настоящего времени примеры и предложения по использованию поверхностей эмиттеров, отличных от сферических, способных в какой-то степени приблизить пучок к ламинарному.

Дается оценка эффективности двух известных методов (метод анализа и метод синтеза) расчета электронно-оптических систем.

2. В первой главе диссертации дается точное (непараксимальное) уравнение траекторий в осесимметричной электронной пушке, а также теория и расчетная методика, позволяющая с помощью ЭВМ реализовать идею отыскания той формы эмиттирующей поверхности катода, которая обеспечивает ламинарность потока на выходе.

Описано проведенное исследование распределения напряженности электрического поля на поверхности эмиттеров и его зависимость от геометрии электродов и других электромагнитных параметров пушки.

3. Вторая глава диссертации посвящена расчетной программе для ЭВМ СДС-6500, где кратко описываются расчетный метод, граничные условия и принцип работы программы.

Дается описание алгоритма вычисления объемного заряда в каждой точке пучка для использования в уравнении Пуассона и автоматического корректирования формы поверхности эмиттера в процессе достижения ламинарности потока.

Описываются основы способа не автоматического нахождения оптимума по однородности распределения электрического поля на поверхности эмиттера.

4. В третьей главе диссертации приведены результаты численного счета при выборе различных законов распределения плотности эмиссии на поверхности эмиттера и выяснено влияние выбора закона на рассчитываемые формы эмиттеров. Показано, что выбор закона как Шоттки, так и закона "3/2" приводит практически к одному и тому же результату /7/.

Приведены полные наборы всех геометрических и электромагнитных параметров шести вариантов оптических схем электронных пушек с ламинарным потоком на выходе, а также исследуется влияние изменения параметров на ламинарность. Рассчитаны траектории электронов в пучке, следующих на фронте и спаде импульсов напряжения.

Исследованы условия возникновения виртуального катода. Дана оценка влияния продольной составляющей магнитного поля, вызванной вращением пучка.

5. В четвертой главе диссертации приведено сравнение расчетов с экспериментами для двух вариантов (диаметр эмиттеров 7 см и 8 см) электронной пушки ЭЭП-2.

Показано, что при заданных расчетных номинальных параметрах (ток 250 А и напряжение на аноде 500 кВ) для этих двух вариантов электронной пушки экспериментально были исследованы характеристики пучка для широкого диапазона изменения значений как тока (до 150 А) и напряжения (до 430 кВ), так и величины фокусирующего магнитного поля в пределах $4\% \pm 11\%$. Измеренное распределение плотности тока $j(z)$ по сечению пучка через каждые 0,5+1 мм довольно хорошо согласуется с расчетными результатами при всех изменениях вышеупомянутых параметров.

Оценка эмиттанса пучка на выходе каждого варианта пушки на расстоянии 36 см от эмиттера проводилась путём анализа расходимости струйки тока, берущей начало в произвольных точках сечения пучка, проходящей через отверстие диаметром 2,6 мм в коллиматоре и попадающей на коллектор, который перемещался поперёк этой струйки тока и отстоял от коллиматора на расстоянии 3,7 см. Оцененный таким способом эмиттанс пучка практически равнялся нулю.

Основные выводы

1. Разработана теория и дан алгоритм расчета на ЭВМ, обеспечивающий синтез оптической схемы осесимметричной сильноточной электронной пушки с ламинарным потоком на выходе.

Основным фактором, приводящим к формированию ламинарного потока, является целенаправленная, автоматически выполняемая ЭВМ, деформация формы эмиттера катода при фиксированных других оптических элементах пушки.

2. Созданы вычислительные программы самосогласованного с учетом объёмного заряда расчета осесимметричных диодных и трех-

электродных сильноточных электронных пушек с ламинарным потоком на выходе.

3. Доказана сходимость с заданной точностью процесса деформации формы эмиттера к искомой.

4. Показана возможность создания электронно-оптических схем осесимметричных сильноточных пушек с ламинарным потоком, в которых эмиттер работает в условиях ограничения плотности эмиссии температурой катода (закон Шоттки) и дана соответствующая программа расчетов формирования ламинарного потока на ЭВМ.

5. Показано, что как расчет по программе с учетом справедливости закона Шоттки, так и закона "3/2", приводят практически к одной и той же единственной форме эмиттера, приводящей к ламинарности потока, при фиксированных других оптических элементах пушки.

6. Рассчитаны шесть конкретных вариантов электронных пушек с ламинарным потоком, имеющих удовлетворительные расчетные распределения напряженности электрического поля на поверхности эмиттеров, из которых два варианта были реализованы в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

7. Экспериментальные исследования показали, что имеется согласие теории с экспериментом в широком диапазоне изменений электромагнитных параметров обеих пушек, рассчитанных по разработанной в диссертации методике.

Для значений тока до 150 А и напряжения до 430 кВ точность совпадения измеренного диаметра пучка с соответствующими расчетными данными с учетом многочисленных погрешностей измерения составляла $9\% \pm 24\%$ во всём диапазоне изменений магнитного поля. При этом оцененный эмиттанс пучка в каждом случае по результатам исследования расходимости струйки тока в произвольных точках

сечения пучка на выходе пушки на расстоянии 36 см от поверхности эмиттера практически равнялся нулю.

Литература

1. Матора И.М., Меркулов Л.А., Шелонцев И.И. О формировании пучка электронов в линейном индукционном ускорителе. ОИЯИ, Р9-5268, Дубна, 1970; ЖТФ, 1971, 41, 7, 1469.
2. Вахрушин Ю.П., Иванова Н.И., Комаров О.Л., Кузнецов В.С., Матора И.М., Меркулов Л.А., Никольский М.А., Фидельская Р.П., Шелонцев И.И. Некоторые вопросы выбора и расчета фокусирующей системы линейного индукционного ускорителя на 30 МэВ. ОИЯИ, Р9-5714, Дубна, 1971.
3. Anatsky A.I., Alexeev R.A., Ananjev V.D., Antsupov P.S., Belov V.P., Buksaev P.V., Bogdanov O.S., Vachrushin Yu.P., Gagen-Torn V.K., Glukhikh V.N., Kolesov N.I., Komar E.G., Komarov O.L., Kuznetsov V.S., Malyshev I.F., Matora I.M., Merkulov L.A., Popkovich A.V., Fefelov P.A., Khalchitsky E.P., Kharjuzov R.V., Jazvitsky Yu.S., Design of 30-MeV High-Current Linear Induction Electron Accelerator-Injector for ИБР-2 Pulsed Reactor. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1971, NS-18, 3, 625.

4. Андупов П.С., Матора И.М., Меркулов Л.А. Исследование экранирования магнитного поля земли пермаллоевыми сердечниками индукторов линейного индукционного ускорителя. ОИЯИ, Р9-4498, Дубна, 1969.
5. Матора И.М., Меркулов Л.А. Расчет экспериментальной электронной пушки ЭЭП-2. В сб. "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" (материалы Всесоюзной конференции, г. Томск, 3-5 сентября 1975 г.) изд. ТГУ, Томск, 1975.
6. Матора И.М., Меркулов Л.А. Формирование ламинарного потока в сильноточной электронной пушке. ОИЯИ, Р9-9476, Дубна, 1976; Радиотехника и электроника, 1977, 22, 6, 1246.
7. Матора И.М., Меркулов Л.А. Влияние распределения плотности эмиссии катода на характер потока в сильноточной электронной пушке. ОИЯИ, Р9-10795, Дубна, 1977.
8. Матора И.М., Меркулов Л.А. Поведение ламинарного пучка в мощной электронной пушке при изменении её параметров. ОИЯИ, Р9-9818, Дубна, 1976.
9. Матора И.М., Меркулов Л.А. Формирование ламинарного потока в трехэлектродной сильноточной осесимметричной электронной пушке. ОИЯИ, Р9-10504, Дубна, 1977.
10. Матора И.М., Меркулов Л.А. Осесимметричная пушка на энергию электронов 300 кэВ и ток 250 А с ламинарным потоком. ОИЯИ, Р9-10670, Дубна, 1977.
11. Андупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Бжков В.Н., Журавлев В.В., Заббаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М., Меркулов Л.А., Метёлкин Ю.А., Петренко Ю.Д., Саввин В.А., Стрелина О.А., Харьзов Р.В., Швец В.А. Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2. ОИЯИ, Р9-10999, Дубна, 1977.

Рукопись поступила в издательский отдел
2 июня 1978 года.