

# Модель микроканонического пучка Капчинского-Владимирского при исследовании электростатических фокусирующих и ускоряющих устройств

Е.С. Никулин, П.Н. Остроумов, О.Т. Фролов, В.П. Якушев  
 Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия

Разработка электростатических фокусирующих и ускоряющих устройств, особенно на начальном этапе, когда вариантов много, требует инструмента, который позволяет быстро исследовать и сравнивать возможности различных предложений по формированию пучка. В силу своей простоты, наглядности и однозначности результатов одним из наиболее удобных и эффективных инструментов может быть модель "микроканонического" пучка (МКП) Капчинского-Владимирского [1,2]. Учитывая самые существенные для фокусировки пучка моменты, модель даёт правильные результаты по размеру и расходимости для основной части реального пучка с более сложным распределением частиц в фазовом пространстве. В отличие от более детальных моделей «крупных частиц» (КЧ) (например, [3]) МКП позволяет в течение секунд получать результаты при изменении параметров источника и системы фокусирования. МКП лаконично учитывает определяющие параметры пучка: ток и эмиттанс (площадь эллипса, деленная на  $3,1416..$ ; эллипс определяет проекцию поперечного фазового объема частиц пучка на фазовую плоскость  $X, X'$ ; конфигурация эллипса однозначно определяет радиус и наклон огибающей). У МКП всегда постоянная плотность тока в поперечном сечении пучка. Уникальное свойство МКП (неискажение эллипса в линейных формирующих устройствах) позволяет проводить расчеты в "обратном направлении", т.е. от приемника пучка к его источнику, и находить необходимые условия для оптимального согласования эмиттанса пучка с акцептансом приемника.

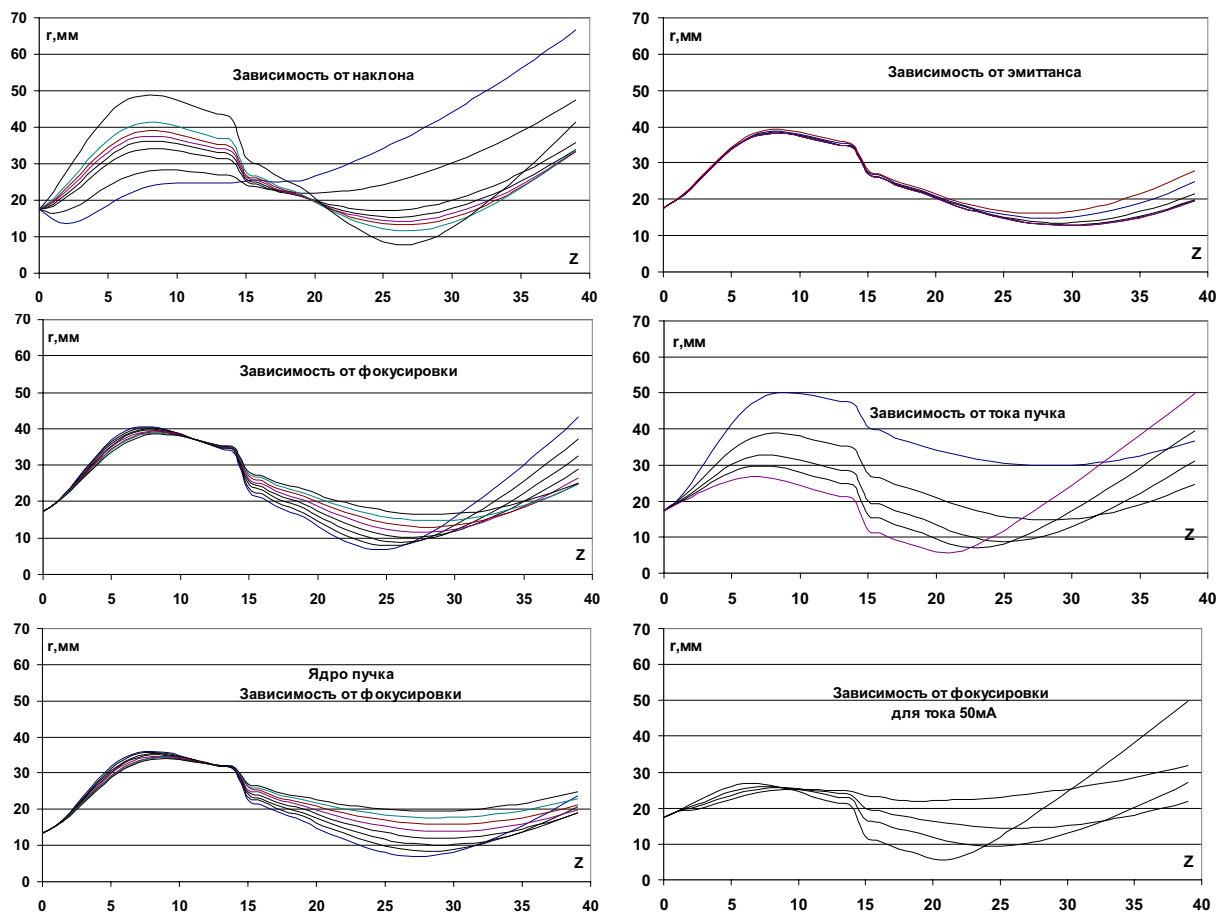


Рис. 1. Огибающие МКП в УТ на 400 кВ и на участке дрейфа 1500 мм до канала транспортировки. Масштаб по оси пучка неравномерный: интервалы 1 - 14, 20 мм; 15, 200 мм; 16 - 19, 40 мм; 20 - 39, 75 мм.

Для нерелятивистского осесимметричного МКП в электрических полях в параксиальном приближении уравнение для радиуса огибающей принимает вид

$$\frac{d^2r}{dz^2} + \frac{1}{2U} \frac{\partial U}{\partial z} \frac{dr}{dz} + \frac{1}{4U} \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} r - \frac{F_u^2}{r^3} - \frac{A}{r} = 0$$

где  $z$  – координата на оси пучка,  $U$  – потенциал в точке  $z$ , соответствующий энергии частиц,  $A \sim \sqrt{m}e$  и для протонов  $A = 2.57 \cdot 10^{-2} \cdot I(U)^{3/2}$  [мА/кВ<sup>3/2</sup>],  $F_u^2 = F_0^2 U_0/U$ ,  $U_0$  – потенциал, соответствующий энергии частиц пучка, при которой измерен эмиттанс  $F_0$ .

В большинстве применений вполне достаточная точность получается при замене истинного хода потенциала ломаной, т.е. приближением ряда участков с постоянным ускорением (или дрейфом) и тонкими линзами на границах участков. Далее приводятся конкретные применения МКП в ускоряющих и формирующих устройствах с осевой симметрией.

В импульсном нейтронном генераторе ИНГ-2 [3] для исследований по физике реакторов была разработана ускорительная трубка на 300 кВ для интенсивного пучка дейтронов. Оптимальное согласование ионного источника с сотовой системой вытягивания с 19 отверстиями и твердой тритиевой мишени выполнено с помощью расчетов МКП. В результате синтеза была выбрана конструкция с 3 ускоряющими промежутками длиной 31, 25 и 38 мм (по ходу пучка от ионного источника), разделенными участками дрейфа ~ 460 и 300 мм. Выполненная по расчетам конструкция трубки обеспечила адекватную фокусировку пучка, и не потребовалось никаких переделок. Был получен импульсный пучок дейтронов с током 100 мА, тогда как в предыдущем генераторе ИНГ с другой формирующей системой только 21 мА [5].

Некоторые из формирующих возможностей ускорительной трубки [6] протонного инжектора [7] линейного ускорителя Московской мезонной фабрики иллюстрируются на рис. 1 семействами огибающих.

Расчётные параметры пучка (начальный радиус огибающей 17,5 мм; начальный наклон огибающей 0,07 рад, нормализованный эмиттанс  $5 \pi$ -мм-мрад, ток пучка 150 мА, напряжение вытягивания 11 кВ, напряжение фокусировки 15 кВ) остаются неизменными за исключением параметра, зависимость от которого исследуется.

При наборе начального наклона огибающей: -0,2; -0,1; 0; 0,03; 0,05; 0,07; 0,1 и 0,2 рад – размер пучка в УТ соответственно растёт, но размер его на выходе УТ (за исключением значений 0,2 и -0,2 рад) практически одинаков, а наклон огибающих различен, причём для значений от 0,03 до 0,1 рад размер пучка в конце участка дрейфа 1800 мм примерно одинаков.

Фокусирующее напряжение изменяется через 1 от 10 до 17 кВ. С ростом напряжения размер пучка на выходе УТ увеличивается и при напряжениях 15 – 17 кВ пучок сфокусирован.

Та же зависимость для ядра пучка (параметры: начальный радиус огибающей 13,4 мм; начальный наклон огибающей 0,05 рад; нормализованный эмиттанс  $2,5 \pi$ -мм-мрад; и ток 120 мА) менее ярко выражена и размер пучка меньше.

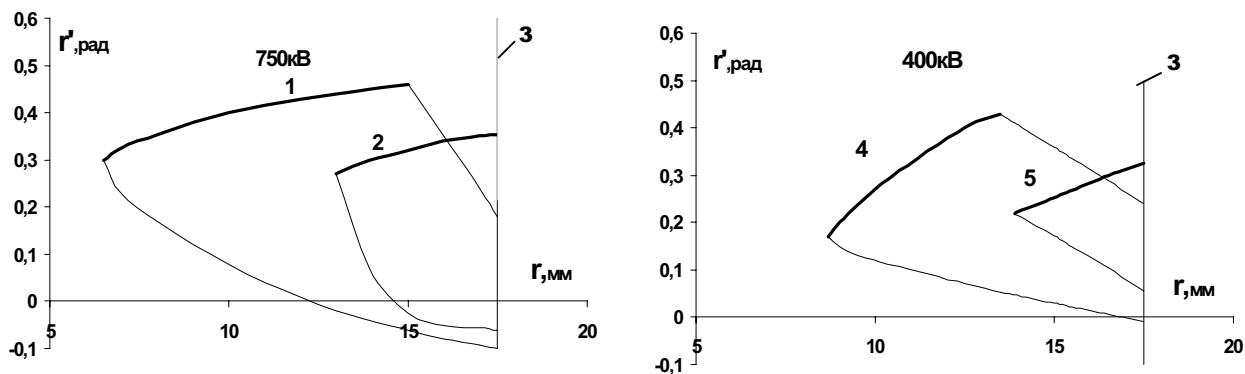
При наборе значений эмиттанса 0,5; 1; 1,5; 3; 5 и 7  $\pi$ -мм-мрад огибающие различаются лишь в конце дрейфа, размер растёт с эмиттансом, а для значений эмиттанса 0,5–1,5  $\pi$ -мм-мрад огибающие практически сливаются.

При значениях тока 50; 75; 100; 150 и 250 мА размеры огибающей в УТ соответственно растут, на участке дрейфа сфокусирован пучок с током 150 мА, поскольку для него напряжение фокусировки 15 кВ оптимально.

Для меньшего тока пучка 50 мА представлены огибающие для набора напряжений фокусировки 16; 26; 35 и 50 кВ. С ростом напряжения размер пучка на выходе УТ растёт. Оптимальным является напряжение 35 кВ. При расчёте каждой из огибающих МКП на персональном компьютере требуется лишь время, необходимое для ввода с клавиатуры величины изменяемых параметров, а при использовании моделей КЧ необходимо около часа.

Ускорительная трубка имеет следующую конструкцию. В поле ускоряющей трубки частицы поступают с энергией, соответствующей вытягивающему напряжению. Вытягивающий электрод представляет сетку с ограничивающей апертурой  $\varnothing 35$  мм. Далее частицы попадают в поле фокусирующего электрода, доускоряются им и уже с этой энергией попадают в первый ускоряющий промежуток, состоящий из цилиндра (с потенциалом фокусировки)  $\varnothing 200$  мм и сетки. Сетка находится на расстоянии 280 мм от электрода вытягивания. Зазор между цилиндром и сеткой 100 мм. Именно этот промежуток в основном формирует пучок, делает его размер и сходимости достаточными для согласования со входом в канал транспортировки. Второй промежуток в основном представляет равномерное поле с небольшой фокусировкой и заканчивается диафрагмой с отверстием  $\varnothing 70$  мм.

Из огибающих могут быть реализованы лишь те, которые имеют радиус меньше, чем ограничивающие диафрагмы: в вытягивающем электроде ( $\varnothing 35$  мм), электрод с сеткой в УТ ( $\varnothing 190$  мм), диафрагма на выходе УТ ( $\varnothing 70$  мм) и вход в канал транспортировки ( $\varnothing 50$  мм). Эти огибающие образуют область допустимых значений радиусов и наклонов на входе в УТ. В частности, на рис. 2 сравниваются области для трубки протонного инжектора при работе с напряжением 400 и 750 кВ.



**Рис. 2.** Ток пучка 150 мА, приведенный эмиттанс 1,5 п.м.мрад, напряжение вытягивания 14,5 и 11 кВ для 750 и 400 кВ соответственно. Кривые ограничивают: 1 – область для напряжения фокусировки 24 кВ; 2 – 32 кВ; 4 – 15 кВ; 5 – 20 кВ. 3 – диафрагма в вытягивающем электроде. Утолщенные линии – ограничения по диафрагме на выходе УТ; тонкие линии – ограничения по входу канала транспортировки.

Были рассчитаны огибающие пучка при уменьшении напряжения на УТ и из условия МКП, т.е. равномерной плотности тока по сечению пучка. Найдены токи: а) пучка в индукционном датчике, расположенном на расстоянии 1400 мм от выхода УТ после ограничивающей размер пучка диафрагмы  $\varnothing 50$  мм; б) на изолированной диафрагме в конце трубки  $\varnothing 70/\varnothing 150$  мм. Результаты показаны на рис. 3.

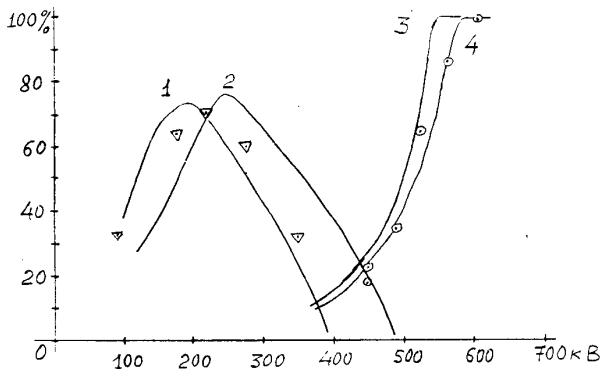
Несмотря на довольно сильные допущения модели МКП, экспериментальные точки легли близко к расчетным кривым, что подтверждает полезность применения МКП для анализа и таких ситуаций, как токопрохождение и ограничение тока пучка. Более того, из совпадения с экспериментальными значениями можно с уверенностью сказать, что пучок на входе УТ имеет наклон огибающей, близкий к значению 0.0 рад. Параметры пучка при этом были: ток – 150 мА; вытягивание – 14,5 кВ, фокусировка – 24 кВ.

Представляет интерес сравнение результатов расчетов по МКП с более детальными и точными, но зато требующими больше времени расчетами по модели КЧ, например по программе КОБРА-3 [3].

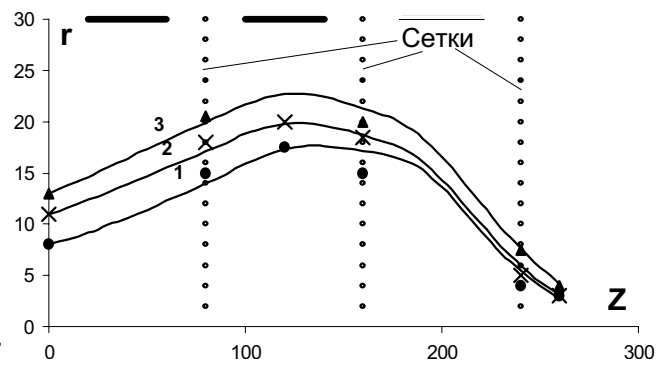
На рис. 4 даются огибающие для трех пучков с разными значениями эмиттансов в фокусирующей электростатической системе из трех последовательных одинаковых линз. Заземленные сетки с расположенными между ними цилиндрами  $\varnothing 60$  мм составляют линзу. Расстояния между сетками 76 мм, длины цилиндров 40 мм, на них поданы положительные потенциалы. Расстояния между сетками и цилиндрами 18 мм [8]. На кривые огибающих нанесены точки, соответствующие расчетам по модели КЧ программой КОБРА-3. Видно, что модель МКП правильно отражает основные фокусирующие свойства даже в этой сложной системе.

Следует особо отметить, что результаты оптимизации формирующей системы по моделям МКП и КЧ совпадают. Разумеется, окончательную проверку и детальную информацию о пучке надо выполнить по модели КЧ.

Таким образом, модель МКП Капчинского-Владимирского является очень удобным и полезным инструментом исследования при анализе и синтезе электростатических систем формирования нерелятивистских пучков, особенно систем с осевой симметрией. Учитывая самые существенные для фокусировки интенсивных пучков параметры (ток, эмиттанс, конфигурация эллипса в фазовом пространстве), модель дает правильные результаты для большей части частиц пучка.



**Рис. 3.** Зависимость расчетных токов от напряжения на УТ. Токи на диафрагме в конце УТ: 1 – начальный наклон огибающей 0,0 рад; 2 – наклон 0,15 рад. Токи в индукционном датчике: 3 – наклон 0,15 рад; 4 – наклон 0,0 рад. Точки – экспериментальные значения.



**Рис. 4.** Огибающие МКП в системе из 3 электростатических линз с сетками. Ток пучка ионов  $Ta^{+20}$  – 60 мА; энергия частиц – 20х60 кэВ. Кривые: 1 – начальн. радиус 8 мм; эмиттанс 0,2 п-мм-рад; напряжения на линзах по ходу пучка 7, 30, 45 кВ; 2 – 11 мм; 0,32 п-мм-рад; 7, 28, 40 кВ; 3 – 13 мм; 0,5 п-мм-рад; 7, 26, 36 кВ. Точки – расчеты по программе КОБРА-3.

### Литература

1. I.M.Kapchinskij, V.V.Vladimirskij. - Proceedings of The International Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation, Geneve, 1959, p.274
2. И.М.Капчинский. Динамика частиц в линейных резонансных ускорителях. Атомиздат, Москва, 1966, с. 194
3. Peter Spadtke. - Proceedings of the 1984 Linear Accelerator Conference. GSI-84-11, Darmstadt, p.356.
4. В.П.Якушев, В.И.Бурлака. ПТЭ, 1978, №5, с.27
5. А.Н.Сербинов и др. ПТЭ, 1965, №6, с.51.
6. Е.Г.Комар. Основы ускорительной техники, Москва, Атомиздат, 1975, с.46-47
7. А.С.Белов и др. - Труды XII Международной конференции по электростатическим ускорителям. Обнинск, 1999, с.199
8. V.I.Derbilov et al. Use of Electrostatic Gridded Lenses in The Laser Ion Source of CERN. - Proceedings of the XVI International Workshop on Charged Particle Linacs, Alushta, Crimea, Ukraine, 1999.