

сообщения
Объединенного
института
ядерных
исследований
Дубна

3647/2-80

4/8-80

9-80-284

Р.Халлер, А.К.Красных

РАСЧЕТ

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КОРРЕКТОРА
И ИНФЛЕКТОРА КУТИ

1980

ВВЕДЕНИЕ

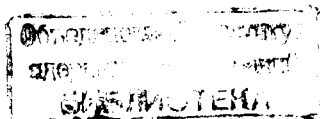
Электрическое поле используется для управления движением заряженных частиц во многих системах и узлах ускорителей. Если известно численное значение напряженности поля, а также пространственное ее распределение, то из этого можно судить о надежности узла в рабочем режиме, об эффективности использования поля, а также получить рекомендации для оптимального конструктивного выполнения элементов, необходимых для создания этого поля. При решении этой задачи могут применяться известные из литературы методики^{/1,2,3/}. В некоторых из них стараются найти общее аналитическое решение, причем даже учитывается наличие движущихся зарядов^{/4/}. Однако из-за сложности проблемы являются необходимыми существенные упрощения и предположения, которые редко можно использовать для реальных конфигураций электродов. В других методиках отказываются с самого начала от общего решения, а проводится численное решение для интересующих нас величин, таких как напряженность, потенциал и т.д., только в некоторой области поля. При этом можно получать большую точность решения даже при сложных конфигурациях электродов.

В настоящей работе показывается, что с помощью так называемой методики эквивалентных зарядов^{/9/} с достаточной точностью и с относительно небольшими вычислительными затратами* рассчитывается электростатическое поле узлов КУТИ - корректора и инфлектора.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Основной принцип применяемой методики заключается в том, что реально возникающее на поверхности электродов распределение зарядов заменяется конечным числом дискретных зарядов (N), находящихся внутри электродов или в неинтересующих нас областях поля^{/5/}. В качестве так называемых эквивалентных зарядов могут использоваться точечные, линейные или кольцевые заряды, причем распределение плотности в этих зарядах постоянно.

* Расчеты проводились с помощью программы для ЭВМ, разработанной в Техническом университете Дрездена, на кафедре ТВН.



Потенциал, который создается зарядом, находящимся в объеме V , определяется в любой точке поля, как известно, из формулы

$$\phi(\omega) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \int_V \frac{\rho(\omega_0)}{|\omega - \omega_0|} d\omega_0, \quad /1/$$

где $\rho(\omega_0)$ - распределение плотности заряда, ω , ω_0 - соответствующие векторы. Поскольку $\rho(\omega_0) = \text{const} = Q$, получим из /1/

$$\phi(\omega) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot P(\omega_0, \omega), \quad /2/$$

где $P(\omega, \omega_0)$ - "потенциальный коэффициент".

При наличии N зарядов с учетом принципа суперпозиции можно написать:

$$\phi(\omega) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^N Q_i P(\omega_{0_i}, \omega). \quad /3/$$

Напряженность поля находится из выражения

$$\vec{E}(\omega) = - \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^N Q_i \text{grad} P(\omega_{0_i}, \omega). \quad /4/$$

Для численного определения значения эквивалентных зарядов должно задаваться их пространственное положение. Кроме того, нужно задать в N точках контур электродов, причем так, чтобы рассчитанное поле совпадало по возможности точно с реально существующим полем. Так, полученная с помощью /3/ система уравнений имеет однозначное решение и позволяет определить значения зарядов, с помощью которых и могут рассчитываться значения потенциала и напряженности в любой точке поля. Полученное таким образом решение совпадает в заданных точках контура точно, а в остальных из-за непрерывности решений уравнения Лапласа по крайней мере приблизительно с реально существующими значениями.

Описанная методика требует относительно малых вычислительных затрат: как времени на ЭВМ, так и памяти.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Электростатическое поле корректора

Вариант конструктивного выполнения корректорных пластин приведен на рис. 1. Пластини^{/8/} представляют собой участок плосковой линии, по торцам соединенной с коаксиальным радиочастотным кабелем. Один конец кабеля соединен с импульсным генератором, другой имеет на конце неотражающую нагрузку. В определенные моменты времени в фидере распространяется им-

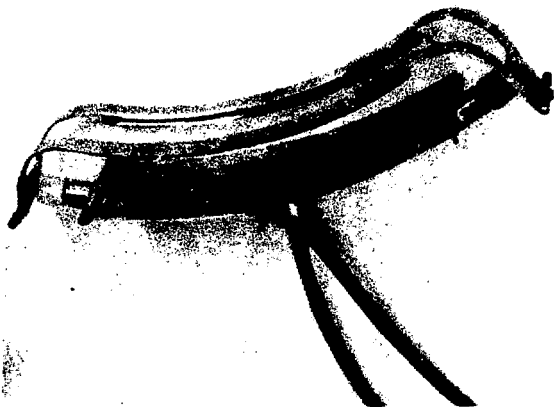


Рис. 1. Общий вид корректорных пластин системы инжекции КУТИ.

пульс напряжения. Пластины расположены внутри адгезатора КУТИ и служат для коррекции траекторий частиц, инжектируемых в камеру $1/8$. Действующая сила коррекции создается электромагнитным полем, которое возникает в момент распространения импульса по пластинам и зависит как от однородности, так и от напряженности этого поля. Эти параметры определяются в основном геометрией пластин в камере адгезатора и величиной подаваемого напряжения. Они могут оцениваться по известному, реально существующему электростатическому полю.

В расчете исходили из реального конструктивного выполнения и расположения корректорных пластин внутри камеры /рис. 2а/. Чтобы оценить влияние геометрии электродов на распределение поля, было дополнительно определено электростатическое поле двух вариантов, причем геометрия высоковольтных электродов изменялась незначительно /рис. 2б, в/. В каждом случае было рассчитано электростатическое поле в той области, в которой должна осуществляться коррекция пучка, т.е. в области $40 \text{ см} \geq R \geq 30 \text{ см}$; $-2 \text{ см} \leq z \leq 2 \text{ см}$ /рис. 2а/.

В качестве эквивалентных применялись кольцевые заряды, а искажение поля на краях корректора в расчете не учитывалось. Для показанного на рис. 3 положения и распределения этих зарядов и точек контура ошибка /по потенциалу/ в расчете в интересующей нас области составляет $\Delta U/U_0 < 10^{-3}$, иначе говоря,

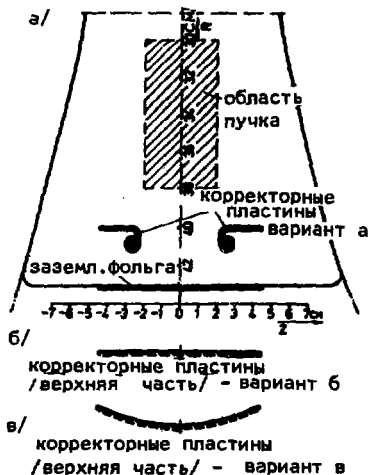


Рис. 2. Поперечное сечение пластин корректора в адге-заторе /вариант а/ и до-полнительные варианты его конструктивного выполнения /варианты б, в/.

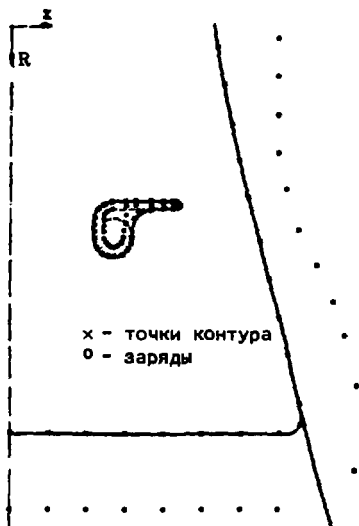


Рис. 3. Расположение коль-цевых зарядов и контурных точек.

реально существующее электростатическое поле моделируется с достаточно высокой точностью.

Из результатов, изображенных на рис. 4, видно, что относи-тельная напряженность $e = |\vec{E}| / U_0$ в области $30 \text{ см} \leq R \leq 37 \text{ см}$ растет приблизительно линейно с радиусом R , причем средний градиент $\Delta e / \Delta R$ составляет $-0,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2}$. При радиусе боль-ше $R \sim 37 \text{ см}$ поле переходит в седловую точку и становится силь-но неоднородным. Для оценки действующей пондеромоторной силы необходимо знать и значения компонент напряженности e_R, e_z /рис. 5/.

Из рис. 5 следует, что радиальные компоненты e_R в медианной плоскости $z=0$ и для плоскости $z=2 \text{ см}$ * практически не отличаются друг от друга до $R \sim 35 \text{ см}$, а для $R > 35 \text{ см}$ e_R силь-но отличаются. Аксиальная компонента e_z , которая в некоторых

* Из-за симметрии рассматривается только область $0 \leq z \leq 2 \text{ см}$.

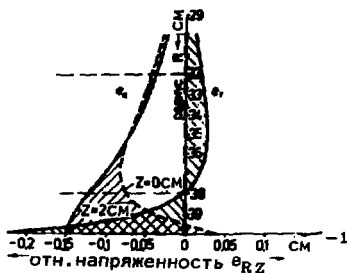
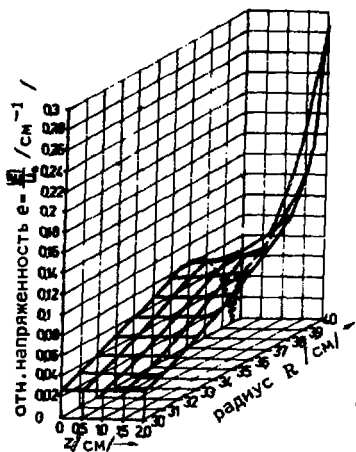


Рис. 5. Радиальная и аксиальная компоненты электрической напряженности / вариант а/.

Рис. 4. Электростатическое поле корректора / вариант а/.

случаях дает дефокусировку пучка, в медианной симметричной плоскости отсутствует, а в плоскости $z = 2$ см при $R = 38$ см меняет знак и становится отрицательной. Выполняя высоковольтный электрод так, как показано на рис. 2 - вариант б, видим /рис. 6/, что по сравнению с вариантом а поле распределяется более равномерно и его напряженность увеличивается. Так, например, значение относительной напряженности e растет при $R = 35$ см и $z = 0$ от $0,069 \text{ см}^{-1}$ /вариант а/ до $0,086 \text{ см}^{-1}$ /вариант б/, т.е. на 25%, и средний градиент $\Delta\varphi/\Delta R$ составляет при варианте б $\sim 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2}$ /см. рис. 6, 4/. Значения радиальной компоненты e_R в плоскости $z = 0$ и $z = 2$ см практически равны, а аксиальная компонента e_z не меняет своего знака /рис. 8а/.

Если выполнить высоковольтный электрод с небольшим изгибом, так, как это показано на рис. 2 - вариант в, то поле остается равномерным, как и при варианте б, но напряженность e выше, чем у предыдущих вариантов /рис. 7/. Так, например, при $R = 35$ см и $z = 0$ e увеличивается от $0,069 \text{ см}^{-1}$ /вариант а/ до $0,093 \text{ см}^{-1}$ /вариант в/, т.е. на 35%, а средний градиент $\Delta\varphi/\Delta R$ составляет $\sim 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-2}$. Радиальная компонента при варианте б не сильно отличается в плоскостях $z = 0$ и $z = 2$ см, но аксиальная компонента e_z примерно та же, что при варианте а /рис. 8б/. Поскольку e_z даст некоторую дефокусировку пучка, сравним

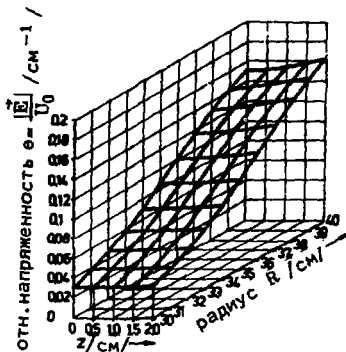


Рис. 6. Электростатическое поле корректора / вариант б /.

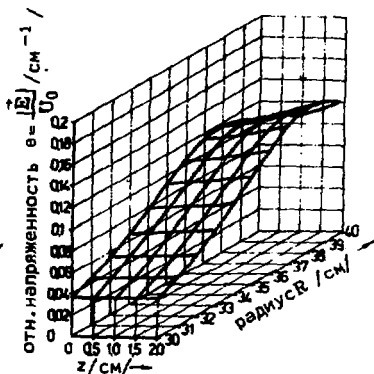


Рис. 7. Электростатическое поле корректора / вариант в /.

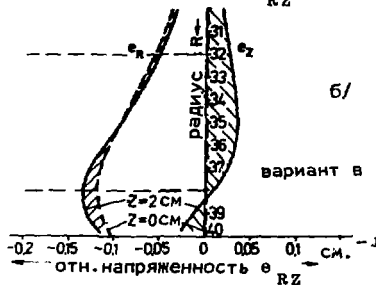
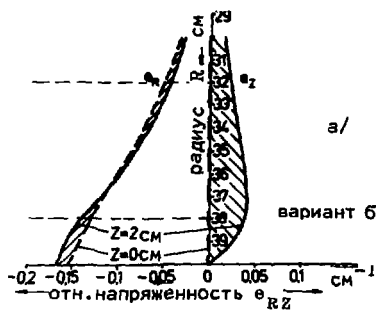


Рис. 8. Радиальные и аксиальные компоненты электрической напряженности: а/ вариант б; б/ вариант в.

рассмотренные три варианта по максимальному значению составляющей электрического поля e_z :

Вариант	$e_{z_{max}}$
а	0,03 см ⁻¹
б	0,04 см ⁻¹
в	0,035 см ⁻¹

/ z = 2 см, 30 см ≤ R ≤ 38 см /.

Таким образом, можно сделать вывод, что в принципе $e_{z_{max}}$, т.е. максимально дефокусирующее действие на пучок за счет e_z , у всех рассмотренных вариантов практически одно и то же.

Сравнивая рассмотренные три варианта конструктивного выполнения пластин корректора по напряженности и равномерности распределения поля, можно заключить, что вариант в является предпочтительным.

Электростатическое поле инфлектора

Инфлектор образует дрейфовую часть канала транспортировки пучка в камеру ^{8/}. Вариант конструктивного выполнения инфлекторного узла приведен на рис.9, и его сечение условно показано на рис.10а. Он представляет собой петлю, по которой в момент инжекции протекает импульс тока, компенсирующий внешнее поле адгезатора. Петля окружена тонким металлическим экраном, который "прозрачен" для медленных полей адгезатора и, наоборот, "непрозрачен" для импульсного магнитного поля петли с током. Во время переходного процесса при создании магнитного поля инфлектора петля имеет некоторый электрический потенциал относительно заземляющего экрана. Вследствие расстояния между петлей и экраном /рис.10а/ электрическая напряженность на краях достаточно велика, что может привести к нежелательному пробоя во время работы ускорителя. Чтобы избежать пробоя, петля должна закругляться так, чтобы с одной стороны, напряженность на краях существенно уменьшалась, а с другой - возникающее внутри петли магнитное поле не искажалось за счет ее изгиба. Несмотря на временный характер существующих переходных процессов, расчет электростатического поля дает оценку возможности решения этих проблем.

Зная параметры электростатического поля, выполнение первого требования можем проверять непосредственно, а выполнение второго - косвенным путем, за счет аналогии между электростатическим и магнитным полем, существующей при некоторых условиях ^{17/}.

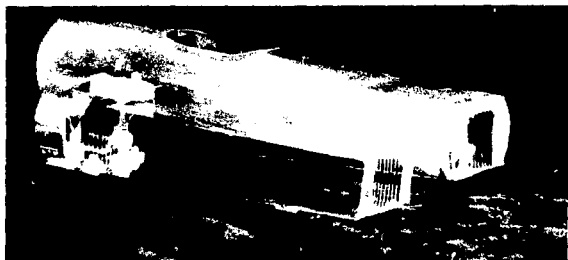


Рис.9 . Общий вид петли инфлектора с экраном.

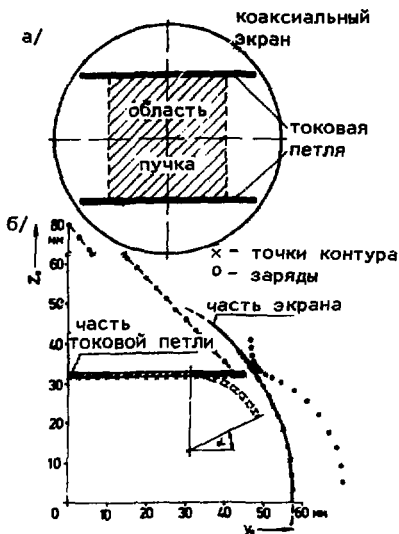


Рис.10. Сечение инфлекторного узла.



Рис.11. Действие закругления пластин /а/ и максимальная напряженность на ее крае /б/.

В расчете предполагалась геометрия конструкции, изображенная на рис.10а, причем рассматривалась в силу симметрии только область, данная на рис.10б. В качестве эквивалентных применялись линейные заряды. При расположении зарядов так, как изображено на рис.10б, ошибка /по потенциалу/ в расчете по вышеизложенной методике меньше 10^{-2} . Степень изгиба краев петли измерялась углом α , который определяется по геометрии, приведенной на рис.10б. В качестве меры неоднородности поля бралось пространственное изменение силовых линий Δu по y в симметричной плоскости ($z=0$), причем сравнивалось с их распределением в идеальном однородном поле, т.е. поле, образованном бесконечными параллельными плоскостями ($\Delta u=0$) /см.рис.10а/.

Рассматривая распределение поля для существующего варианта - рис.10а, видим из рис.11а, что с ростом y и Δu увеличивается, т.е. неоднородность поля растет. Чем больше закругление краев петли /чем меньше угол α /, тем меньше Δu и тем больше однородность поля. При значении $\alpha=30^\circ$ получается не-

который оптимум по однородности, и отклонение Δu составляет в интересующей нас области меньше 2%. При более закругленных краях ($\alpha < 30^\circ$) отклонение Δu снова увеличивается с ростом u и становится отрицательным.

Сравнивая расчетные значения максимальной напряженности, возникающей на краях для существующего и для оптимального варианта ($\alpha = 30^\circ$), видим из рис. 116, что с помощью показанного закругления максимальная напряженность существенно снижается от $0,92 \text{ см}^{-1}$ до $0,58 \text{ см}^{-1}$ ($\alpha = 30^\circ$), т.е. на ~40%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методики эквивалентных зарядов было рассчитано электростатическое поле существующего варианта корректорных пластин в камере адгезатора, а также некоторых вариантов с видоизмененными потенциальными электродами. Анализ полученных результатов позволяет выбрать геометрию, которая имеет напряженность электрического поля на 35% больше, чем в существующем варианте, причем равномерность этого поля в области, занимаемой пучком, лучше.

Аналогичным методом рассчитана напряженность электростатического поля петли инфлектора. В результате анализа получены рекомендации для улучшения конструктивного выполнения этого узла.

Авторы выражают признательность Г.В.Долбилову за постановку задачи, а И.Шпекку за помощь при расчетах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. "Мир", М., 1964.
2. Миролюбов Н.Н. и др. Методы расчета электростатических полей. "Высшая школа", М., 1963.
3. Морс Ф.М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. ИИЛ., М., 1958.
4. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. "Энергия", Л., 1972.
5. Speck J. Die Anwendung der Überlagerungsmethode zur Berechnung elektrostatischer Felder. XXII, IWK, TH Ilmenau, 1977.
6. Саранцев В.П., Перельштейн Э.А. Коллективное ускорение ионов электронными кольцами. Атомиздат, М., 1979.
7. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. "Мир", М., 1972.

8. Долбилов Г.В. и др. В кн.: II Симпозиум по коллективным методам ускорения. ОИЯИ, Д9-10500, Дубна, 1976.
9. Steinbigler M. Anfangsfeldstaerken und Ausnutzungsfaktoren rotationssymmetrischer Anordnungen in Luft. Diss. TH München, 1969.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 апреля 1980 года.