

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
дубна

2086/2-80

12/5-80

9-80-31

Д.Л.Новиков, Н.Г.Шакун

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ  
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ФАЗОТРОНА  
ПРИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ  
НА РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ ИСТОЧНИКА ИОНОВ

1980

Новиков Д.Л., Шакун Н.Г.

9-80-31

Расчет оптимальной геометрии центральной области фазотрона при положительном потенциале на разрядной камере источника ионов

Численными расчетами уравнений движения на ЭВМ в реально моделируемых магнитом и электрических полях центральной области фазотрона с вариацией магнитного поля показано, что при выборе определенной геометрии центральной области ускорителя с использованием источника ионов с положительным потенциалом на разрядной камере можно обеспечить такие условия, при которых пучок частиц, ускоренный до радиусов 30-35 см, будет иметь амплитуды радиальных колебаний, не превышающие 1,2 см.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1980

Novikov D.L., Shakun N.G.

9-80-31

Calculation of Phasotron Central Region Optimal Geometry at a Positive Potential on Discharge Chamber of Ion Source

Как было показано в работе <sup>1/</sup>, при положительном потенциале, поданном на разрядную камеру источника ионов фазотрона, удается обеспечить захват ионов в ускорение с начальными фазами  $\phi_0 = -30 \div +50^\circ$ . При этом максимальная величина амплитуды радиальных колебаний для всей группы захваченных ионов на радиусе 30-35 см оказывается равной 2,4 см.

Однако для обеспечения высокоэффективного вывода частиц из камеры ускорителя желательно уменьшить максимальную величину амплитуды радиальных колебаний на радиусах 30-35 см до 1-1,5 см.

Как известно <sup>2/</sup>, на увеличение амплитуды колебаний, возникающих в центральной области фазотрона, существенное влияние оказывают два фактора:

а/ асимметрия набора энергии ионем на двух ускоряющих щелях дуанта, связанная с геометрией центральной области ускорения,

б/ наличие постоянного отрицательного потенциала смещения на дуанте, который подается в целях борьбы с резонансным высокочастотным разрядом, возникающим в высокочастотной системе.

Настоящая работа выполнена с целью выбора таких условий в центральной области установки "Ф" <sup>3/</sup> фазотрона с пространственной вариацией магнитного поля/, которые привели бы к уменьшению максимальной амплитуды радиальных колебаний, или, что то же самое, к уменьшению амплитуды прецессии центра орбиты ускоренных ионов относительно центра магнитного поля.

При размещении разрядной камеры источника ионов на линии симметрии между дуантом и антидуантной рамкой эквипотенциальные линии ускоряющего высокочастотного поля резко деформируются около источника ионов, что приводит к значительной неоднородности распределения поля на расстоянии до 7 см от источника ионов. В этой зоне при нормальных условиях ускорения находится около десяти оборотов ионов, поэтому формирование центральных орбит происходит в неблагоприятных условиях. Так, например, в некоторых случаях асимметрия в наборе энергии на первых оборотах достигает 10 кэВ/об, что эквивалентно первой гармонике магнитного поля 0,015 Т в зоне, где частота радиальных колебаний примерно равна 1,002. Асимметрия в наборе энергии на первых оборотах может возникнуть также из-за неудачного выбора положения ионного источника относительно центра магнитного поля ускорителя.



На основе расчетов, проведенных в работе /1/, казалось целесообразным сместить разрядную камеру источника ионов по отношению к геометрической оси симметрии, и в соответствии со смещением изменить в этой области конфигурацию дуанта и противодуантной рамки. Расчеты движения ионов в измененной геометрии центральной области установки "Ф" проводились численно на ЭВМ по программе CF3DIM и выполнены для трех конфигураций центральной области.

Решались уравнения следующего вида:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \frac{e}{m_0}(1-\beta^2)^{1/2} [\epsilon_{x1} \cos(\omega t + \phi_0) + \epsilon_{x2} + \dot{y}B_z - \dot{z}B_y], \\ \ddot{y} &= \frac{e}{m_0}(1-\beta^2)^{1/2} [\epsilon_{y1} \cos(\omega t + \phi_0) + \epsilon_{y2} + \dot{z}B_x - \dot{x}B_z], \\ \ddot{z} &= \frac{e}{m_0}(1-\beta^2)^{1/2} [\epsilon_{z1} \cos(\omega t + \phi_0) + \epsilon_{z2} + \dot{x}B_y - \dot{y}B_x]. \end{aligned} \quad /1/$$

Здесь  $\epsilon_{x1}, \epsilon_{y1}, \epsilon_{z1}$  - компоненты векторов переменного электрического поля  $\epsilon_{x2}, \epsilon_{y2}, \epsilon_{z2}$  - компоненты векторов постоянного электрического поля,  $B_x, B_y, B_z$  - компоненты векторов магнитного поля,  $e, m_0$  - заряд и масса ускоряемых ионов,  $\omega$  - переменная во времени частота ускоряющего поля.

Компоненты векторов переменного и постоянного электрических полей определялись как

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= E_x \left(1 - \frac{\dot{x}^2}{c^2}\right) - \frac{\dot{x}\dot{y}}{c^2} E_y - \frac{\dot{x}\dot{z}}{c^2} E_z, \\ \epsilon_y &= E_y \left(1 - \frac{\dot{y}^2}{c^2}\right) - \frac{\dot{y}\dot{x}}{c^2} E_x - \frac{\dot{y}\dot{z}}{c^2} E_z, \\ \epsilon_z &= E_z \left(1 - \frac{\dot{z}^2}{c^2}\right) - \frac{\dot{z}\dot{x}}{c^2} E_x - \frac{\dot{z}\dot{y}}{c^2} E_y. \end{aligned} \quad /2/$$

Трехмерное электрическое поле определялось численно по программам BOUVAL, RUNBOX, RUNPLO /4/. Оно представляло собой суперпозицию трех полей:

- а/ высокочастотного электрического поля,
- б/ постоянного во времени электрического поля смещения на дуанте,
- в/ постоянного электрического поля от потенциала на разрядной камере источника ионов.

Рассматривались электрические поля, образованные различными конфигурациями электродов /V276, V277, V376, V476/.

На рис.1 и 2 показаны эквипотенциалы электрического поля для варианта V376 в медианной плоскости и в плоскости xz для 3 различных сечений при  $y = 0, 10$  и  $20$  мм. Электрическое поле от

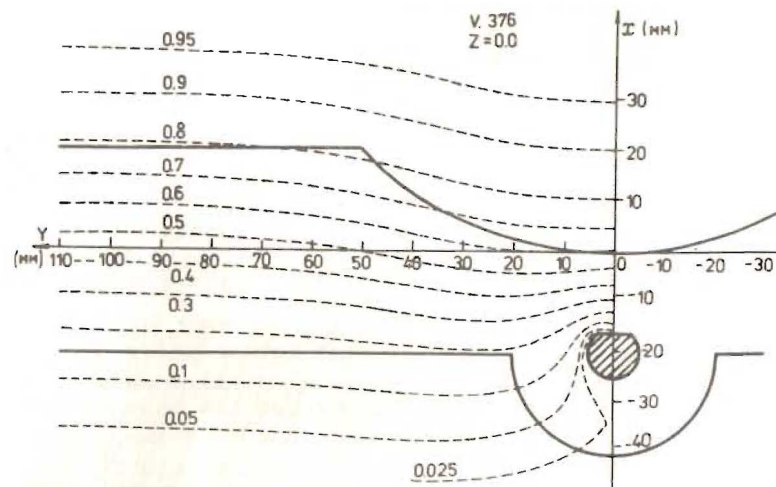


Рис.1. Эквипотенциалы электрического поля V376 в медианной плоскости.

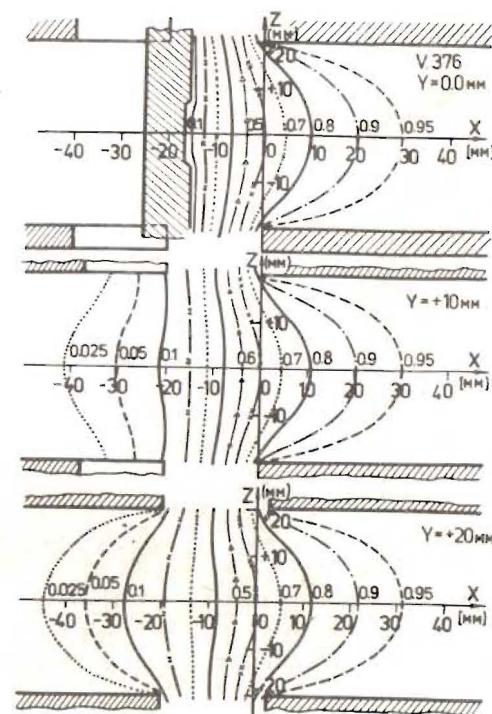


Рис.2. Эквипотенциалы электрического поля V376 в аксиальной плоскости xz.

потенциала смещения на камере источника ионов для V476 показано на рис. 3 и 4.

Переменная во времени частота ускоряющего поля задавалась в виде:

$$\omega = \omega_0 \left( 1 - \frac{1}{\omega_0} \frac{d\omega}{dt} \cdot t \right), \quad /3/$$

где:  $\omega_0 = \frac{eB_0}{m_0}$  - частота на захвате, а  $\frac{d\omega}{dt} = \frac{d\omega}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi \frac{d\alpha}{d\alpha} \cdot \frac{d\alpha}{dt} = 34,607 \cdot 10^{10}$  рад/с, получена при экспериментальном моделировании вариатора частоты.

Магнитное поле  $B^*$  задавалось в виде таблиц для  $B(r)$ ,  $B_4(r)$ ,  $\Theta_4(r)$  /  $B$  - среднее поле,  $B_4$  и  $\Theta_4$  - амплитуда и фаза четвертой гармоники магнитного поля, полученных при моделировании магнитного поля установки "Ф" /5/. Зависимости параметров магнитного поля от радиуса, приведенные на рис. 5, аппроксимировались полиномом восьмой степени по программе APROC с использованием библиотечной программы FUMIL. Компоненты магнитного поля, входящие в уравнение /1/, определялись по формулам:

$$B_z(r, \phi) = B(r) + B_4(r) \cos[\Theta_4(r) - 4\phi],$$

$$B_r(r, \phi, z) = z \left[ \frac{\partial B(r)}{\partial r} + \frac{\partial B_4(r)}{\partial r} \cos(\Theta_4(r) - 4\phi) - B_4(r) \frac{\partial \Theta_4(r)}{\partial r} \sin(\Theta_4(r) - 4\phi) \right], \quad /4/$$

$$B_\phi(r, \phi, z) = \frac{z}{r} [4B_4(r) \cdot \sin(\Theta_4(r) - 4\phi)].$$

В расчетах, в которых нужно было проследить за поведением частицы на радиусах, превышающих 30 см, компонента магнитного поля  $B(r)$  определялась по формуле:

$$B(r) = B_0 \exp(0,359 \xi^2 + 0,83 \xi^6 - 2,351 \xi^8), \quad /5/$$

где:  $\xi = \frac{r}{r_k}$ ,  $r_k = 270$ ,  $B_0 = 1,202287$  Т.

\*При решении системы уравнений /1/ компоненты магнитного поля из цилиндрической системы координат трансформировались в прямоугольную.

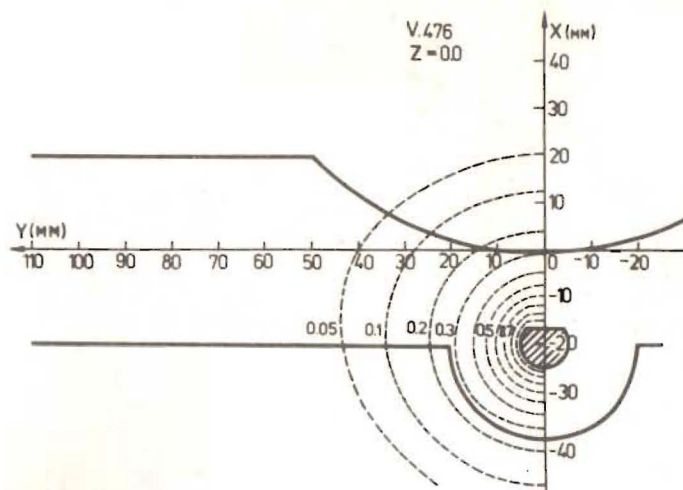


Рис. 3. Эквипотенциалы электрического поля от потенциала на разрядной камере источника ионов V476 в медианной плоскости.

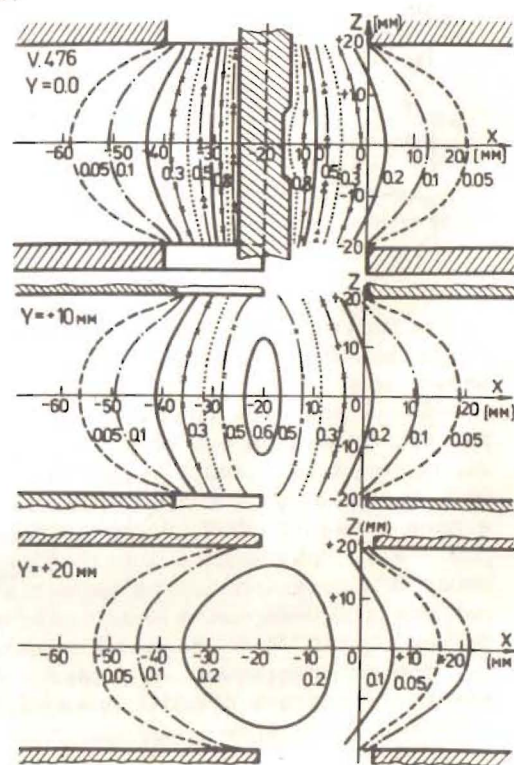


Рис. 4. Эквипотенциалы поля V476 в аксиальной плоскости  $xz$ .



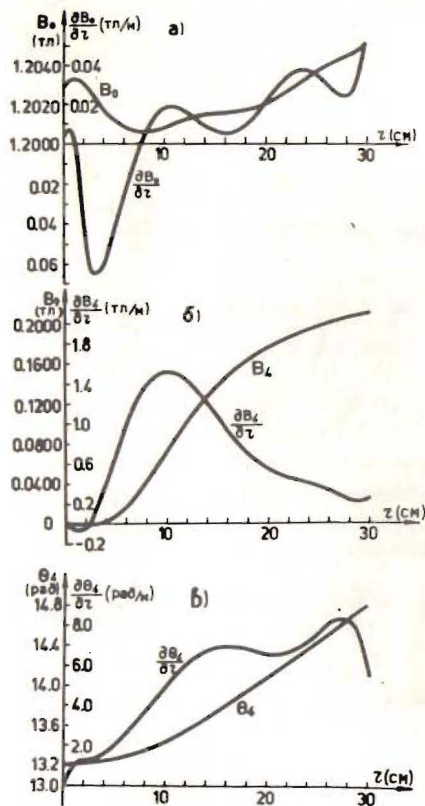


Рис. 5. Зависимости параметров магнитного поля от радиуса.

Расчеты движения ионов в электрическом поле варианта V376 показали, что в процесс ускорения захватываются ионы с начальными фазами от  $0$  до  $50^\circ$ . Максимальная амплитуда радиальных колебаний для этой группы ионов несколько больше  $30$  мм / см. рис. 6/. Сдвижением оси ионного источника относительно магнитного центра не удалось подобрать условий, приводящих к заметному уменьшению амплитуды колебаний. Расчеты движения ионов в поле варианта V277, распределение которого приведено на рис. 7 и 8, проводились для трех различных положений источника ионов относительно центра магнитного поля. В процесс ускорения для этого варианта поля захватываются ионы с начальными фазами  $\phi_0 = -10^\circ \div +40^\circ$ . На рис. 9 показаны траектории центров орбит для ионов с начальными фазами  $\phi_0: -10^\circ, 0^\circ, 20^\circ$  и  $40^\circ$ , начиная с первого оборота при  $x_0 = 3,65$  мм,  $y_0 = 10$  мм до 180-го оборота, когда ионы ускорены до радиуса  $\approx 45$  см.

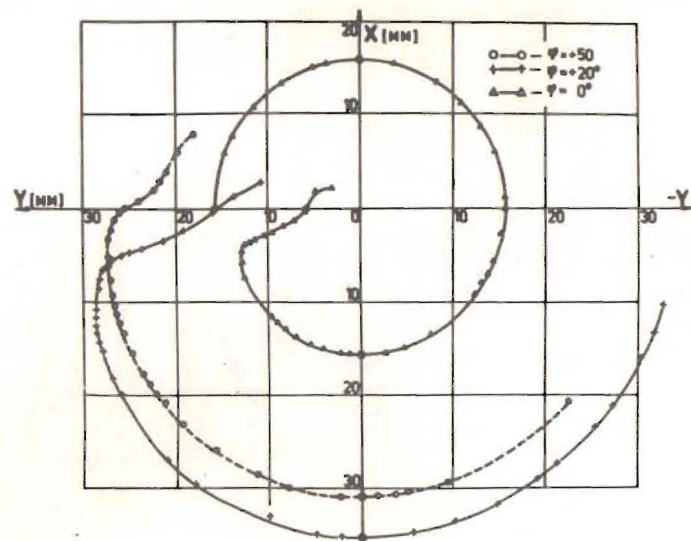


Рис. 6. Траектории центра орбиты в поле V376, V476 для стартовых фаз:  $50, 20, 0^\circ$ .

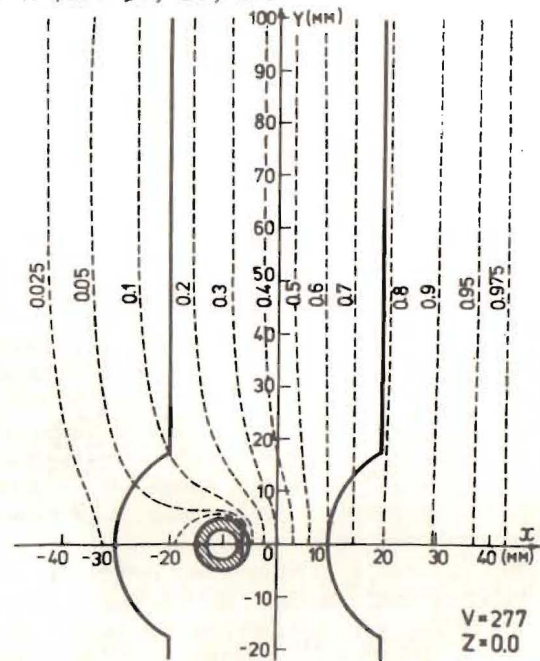


Рис. 7. Эквипотенциали электрического поля V277 в медианной плоскости  $z = 0$ .

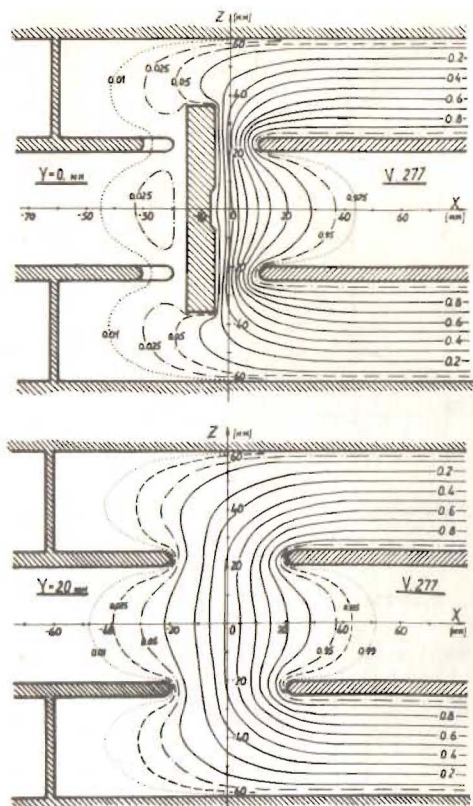


Рис. 8. Эквипотенциали электрического поля V277 в аксиальной плоскости xz.

Из рис. 9 следует, что для всех ионов, находящихся в диапазоне начальных фаз  $-10^\circ \div 40^\circ$ , амплитуда радиальных колебаний при их ускорении от центра до радиуса 45 см не больше 1,2 см. При дальнейшем ускорении ионов до конечного радиуса из-за адиабатического уменьшения амплитуды колебаний ввиду роста среднего магнитного поля амплитуда радиальных колебаний в зоне вывода пучка из камеры ускорителя будет не больше 1,0 см.

Дальнейшее уменьшение амплитуды радиальных колебаний может быть обеспечено путем устранения второго фактора их возникновения - постоянного отрицательного смещения на дуанте. В больших синхроциклотронах ускоряющая система, как правило, имеет один дуант. Противодуантная заземленная рамка устанавливается только в центральной части ускорителя, либо, из-за различных трудностей ее размещения, вообще отсутствует. Поэтому очень часто не удается обеспечить симметричное подключение отрицательного потенциала смещения на дуант и на противодуантную рамку одновременно. Задача устранения асимметрии в наборе

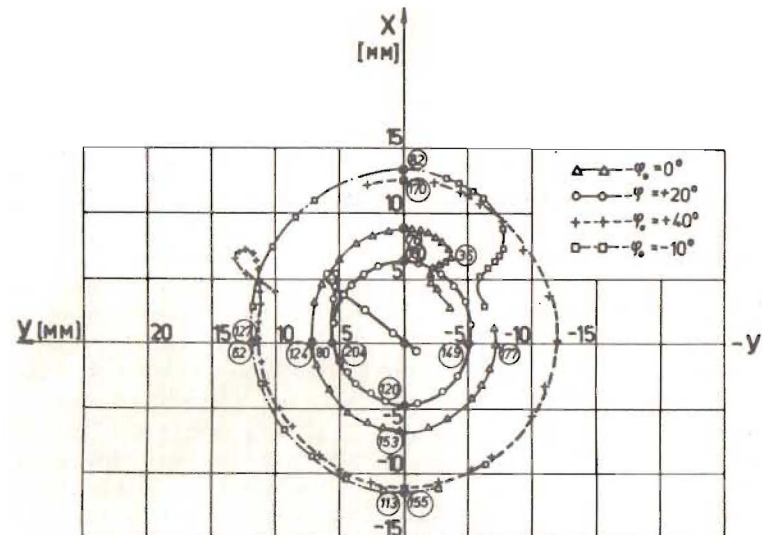


Рис. 9. Траектории центра орбиты в поле V277, V476 для стартовых фаз: 0, 20, 40,  $-10^\circ$ .

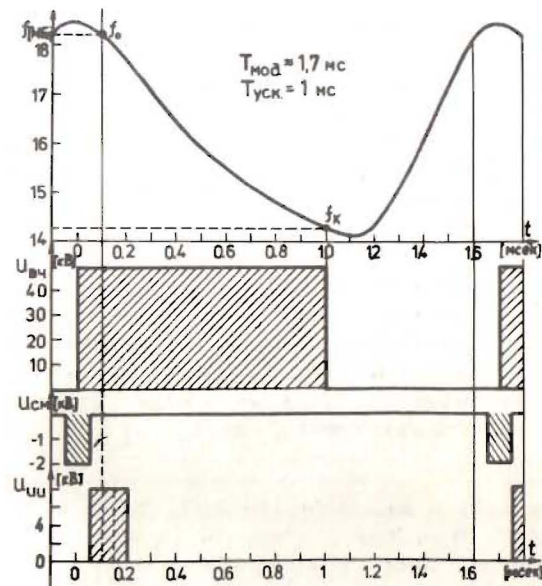


Рис. 10. Временные диаграммы импульсного питания напряжения смещения на дуанте и источника ионов.



энергии при наличии смещения на дуанте может быть относительно просто решена организацией импульсного питания напряжения смещения /6/.

Напряжение смещения на дуант по импульсной схеме питания подается только в момент нарастания высокочастотного напряжения. Так как это нарастание имеет место в каждом цикле ускорения, то частота посылок отрицательного смещения должна быть строго равна частоте модуляции высокочастотного напряжения. Начало импульса смещения необходимо подать до начала ускорения, поэтому, если в частотном диапазоне высокочастотной системы есть запас, то его можно включать на прямой ход цикла ускорения, если же запас частот мал, то импульс смещения можно подать до начала прямого хода кривой модуляции, чтобы в момент нарастания в.ч. напряжения до нормального уровня на дуанте уже было полное напряжение смещения. Конец импульса /задний фронт/ напряжения смещения должен совпадать с началом захвата частиц в процесс ускорения, т.е. с начальной частотой захвата диапазона частот  $f_0$ . Положительное напряжение на разрядную камеру источника ионов можно также подавать импульсно. Примерная временная последовательность импульсного питания напряжения смещения дуанта и источника ионов показана на рис. 10.

Необходимо заметить, что снятие напряжения смещения на дуанте неоднозначно приводит к уменьшению амплитуды колебаний, а в некоторых случаях может привести к ее возрастанию, например, когда асимметрия набора энергии на ускоряющих щелях дуанта из-за неудачно подобранной геометрии имеет противоположное значение асимметрии, вызываемой напряжением смещения. Это означает, что для каждого конкретного случая с учетом реальных условий требуется проводить индивидуальную оптимизацию геометрии центральной области.

Таким образом, расчетами на ЭВМ уравнений движения в реально моделируемых магнитном и электрических полях показано, что при выборе определенной геометрии центральной области ускорителя с использованием источника ионов с положительным потенциалом на его разрядной камере можно обеспечить такие условия, при которых ускоряемый пучок нормальной интенсивности будет иметь на радиусах 30-35 см амплитуды свободных радиальных колебаний, не превышающие 1,2 см.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Замолодчиков Б.И. и др. ОИЯИ, P9-9284, Дубна, 1975.
2. Richardson J.R. Phys.Rev., 1948, 73, p.424.
3. Глазов А.А. и др. ОИЯИ, 9-3211, Дубна, 1967.
4. Ворожцов С.Б., Шакун Н.Г. ОИЯИ, D10-7707, Дубна, 1974, с.159.
5. Аленицкий Ю.Г. и др. ОИЯИ, P9-5346, Дубна, 1976.
6. Glasgow L.R. et al. IEEE Trans., 1973, NS-20, p.25.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 января 1980 года.

## Нет ли пробелов в Вашей библиотеке?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

P1,2-7642	Труды Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Гомель, 1973.	7 р. 15 к.
D1,2-8405	Труды IV Международного симпозиума по физике высоких энергий и элементарных частиц. Варна, 1974.	2 р. 05 к.
P1,2-8529	Труды Международной школы-семинара молодых ученых. Актуальные проблемы физики элементарных частиц. Сочи, 1974.	2 р. 60 к.
D6-8846	XIV совещание по ядерной спектроскопии и теории ядра. Дубна, 1975.	1 р. 90 к.
D13-9164	Международное совещание по методам проволочных камер. Дубна, 1975.	4 р. 20 к.
D1,2-9224	IV Международный семинар по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1975.	3 р. 60 к.
D13-9287	Труды VIII Международного симпозиума по ядерной электронике. Дубна, 1975.	5 р. 00 к.
D7-9734	Международная школа-семинар по взаимодействию тяжелых ионов с ядрами и синтезу новых элементов /Дубна, 1975/.	3 р. 00 к.
D2-9788	Нелокальные, нелинейные и неренормируемые теории поля /Алушта, 1976/.	2 р. 40 к.
D-9920	Труды Международной конференции по избранным вопросам структуры ядра. Дубна, 1976.	3 р. 50 к.
D9-10500	Труды II Симпозиума по коллективным методам ускорения. Дубна, 1976.	2 р. 50 к.
D2-10533	Труды X Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Баку, 1976.	3 р. 50 к.
D13-11182	Труды IX Международного симпозиума по ядерной электронике. Варна, 1977.	5 р. 00 к.
D10,11-11264	Труды Совещания по программированию и математическим методам решения физических задач. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.
D17-11490	Труды Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1977.	6 р. 00 к.