

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 539.1.047+621.3.038.615

**МАГНИТНЫЙ СКАНЕР ДЛЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ
ПУЧКОВ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

© 2019 г. А. А. Голубев^а, А. В. Канцырев^а, В. А. Панюшкин^{а,*},
О. С. Сергеева^а, В. С. Скачков^а, В. В. Васильев^а

^а Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 117218, Москва, ул. Б. Черемушкинская, 25

*e-mail: Vsevolod.Panyushkin@itep.ru

Поступила в редакцию 29.03.2019 г.

После доработки 29.03.2019 г.

Принята к публикации 13.04.2019 г.

Для решения широкого круга прикладных задач по материаловедению и радиобиологии выполнен расчет компактного магнитного сканера, предназначенного для однородного облучения неподвижных мишеней размером до 200×200 мм пучком тяжелых заряженных частиц (т.з.ч.) с отношением заряда к массе $Z/A = 0.3-0.5$. Сканер оптимизирован для работы с пучком тяжелых ионов с отношением $Z/A = 0.3$, энергией – 800 МэВ/а.е.м. и эмиттансом – $40 \text{ п} \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ как в одиночном, так и в мультикадровом режиме облучения. Разработанный сканер состоит из двух компактных сканирующих диполей (один за другим) и может быть размещен вместе с другими ионно-оптическими элементами на ограниченном пространстве канала транспортировки пучков т.з.ч. к мишенной камере, где осуществляется развертка по двумерному полю облучения. Представлены также и обсуждены основные характеристики источника импульсного питания сканера при медленном выводе пучков ионов.

DOI: 10.1134/S0032816219050203

ВВЕДЕНИЕ

Пучки высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц (т.з.ч.) являются уникальным инструментом, позволяющим создавать высокие температуры, давления и радиационные повреждения в исследуемых материалах. Круг проводимых исследований определяется разнообразием физических задач, спектром облучаемых материалов и условиями проведения экспериментов [1–4]. В частности, пучки т.з.ч. используют для обработки различных материалов [2], для магниторезонансной диагностики и облучения злокачественных образований в организме человека [3, 4].

В данной работе описаны результаты разработки конструкции и режимов работы магнитного сканера – основного узла экспериментальной установки по проведению прикладных исследований по воздействию т.з.ч. с энергией до 0.8 ГэВ/а.е.м. на электронную компонентную базу космических и летательных аппаратов, спецтехнику и биологические объекты [1].

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В задачи работы входило проектирование системы магнитной оптики и системы сканирова-

ния пучка. Разрабатываемые системы должны отвечать параметрам, представленным в табл. 1 [1].

Наряду с пучками ускоренных протонов и легких ионов d^+ , C^{6+} , Li^{3+} наиболее высокой зарядности, в подобных экспериментальных установках используют также пучки тяжелых ионов Ag, Kr, Xe, Au с массовым числом до $A = 197$ и отношением заряда к массе $Z/A = 0.3-0.45$. Время медленного вывода пучка интенсивностью до 10^6 ионов/($\text{см}^2 \cdot \text{с}$) на облучаемый объект составляет до 30 с. Неравномерность распределения флюенса на объекте с наибольшим размером $L_S \times L_S = 200 \times 200$ мм должна быть $\leq \pm 15\%$. В процессе облучения исследуемый объект остается неподвижным.

На рис. 1 показана магнитная жесткость R_p , соответствующая полностью или частично ободраным ионам, которая должна быть обеспечена магнитами сканера для двух значений энергии – $T = 0.25$ и 0.8 ГэВ/а.е.м. – ионов с различным отношением Z/A .

Расчет сканера выполнен для наибольшей жесткости, $16 \text{ Тл} \cdot \text{м}$, соответствующей иону $^{197}\text{Au}^{59+}$ с пониженной зарядностью $Z/A = 0.3$ и для пучков с наибольшим эмиттансом.

Таблица 1. Параметры ионного пучка

| Тип иона | d^+, C^{6+}, Li^{3+} | Ar, Kr, Xe, Au |
|---|---|----------------|
| Z/A | 0.45–0.5 | 0.3–0.5 |
| Параметры Твисса | $\alpha_x = 2.22,$ $\beta_x = 13.94;$ $\alpha_y = -0.65,$ $\beta_y = 3.56$ | |
| Энергетический разброс | 0.2 % | |
| Длительность выведенного пучка, с | 2–30 | |
| Интенсивность пучка, ионов/(см ² · с) | 10–10 ⁶ | |
| Поле облучения (макс.), мм ² | $S_{scan} = 200 \times 200$ | |
| Неоднородность облучения | $\leq \pm 15\%$ | |
| Энергия ионов, МэВ/а.е.м. | 250 | 800 |
| $\epsilon_x (\epsilon_y = \epsilon_x), \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ | 40 | 10 |

Таблица 2. Расчетные параметры магнитов сканера

| Магнит | $B, \text{Тл}$ | $L_M, \text{м}$ | $R, \text{м}$ | $h, \text{мм}$ | $\phi, \text{градус}$ |
|--------|----------------|-----------------|---------------|----------------|-----------------------|
| VDM | 0.9 | 0.5 | 19 | 7 | 1.53 |
| HDM | 0.9 | 0.6 | 19 | 10 | 1.86 |

Ввиду обычного дефицита пространства на канале транспортировки длину L_B сканера, включающую длины L_{M1} вертикально (VDM – Vertical Deflection Magnet) и L_{M2} горизонтально (HDM – Horizontal Deflection Magnet) отклоняющих магнитов, а также L_D – участок дрейфа ионов до облучаемого объекта, минимизируют.

При фиксированной длине, например $L_B = 4 \text{ м}$, параметры VDM сканера: радиус R поворота иона, длина магнита L_M , поперечное отклонение иона на выходе из него $h = L_B \sin \phi - (L_S/2) \cos \phi$ – связаны следующим соотношением с магнитным полем B :

$$R = \frac{h}{1 - \cos \phi} = \frac{L_M}{\sin \phi} = \frac{R_i}{B},$$

где ϕ – угол преломления траектории иона.

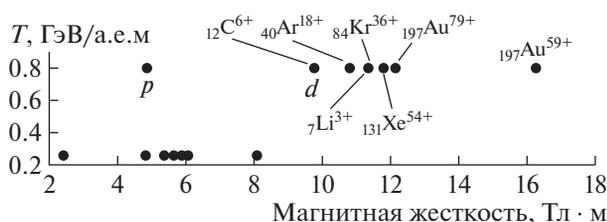


Рис. 1. Магнитная жесткость для ряда ионов.

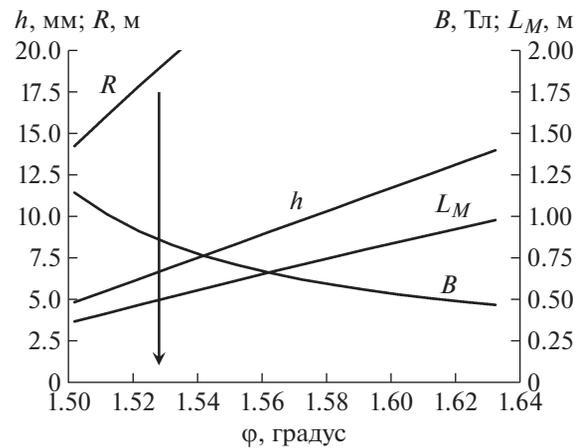


Рис. 2. Зависимость магнитного поля и геометрических параметров VDM от угла отклонения.

На рис. 2 показана зависимость этих параметров от угла ϕ . Предпочтительный режим возникает вблизи $\phi = 1.52^\circ$. Здесь поле составляет $B \approx 0.9 \text{ Тл}$, длина магнита $L_M \approx 0.5 \text{ м}$, в то время как уширение апертуры вследствие смещения пучка в поперечной плоскости не превышает $2h \approx 15 \text{ мм}$. Значительно более жесткий режим у HDM (табл. 2). Приведенные значения являются исходными для оптимизации сканера.

РЕЖИМЫ ОБЛУЧЕНИЯ

Для повышения однородности облучения предпочтительным представляется режим, при котором образец облучается при движении пучка вдоль ряда горизонтальных строк, соединенных участками поворота пучка за пределами поля облучения. Такой режим наиболее эффективен в установках, где не предполагается использования каких-либо систем автоматизированного управления интенсивностью пучка т.з.ч., подобно тому, как это предложено в [3]. К тому же система управления возбуждением магнитов сканера значительно проще по сравнению с разверткой в полярных координатах [4].

Интенсивность пучка описывается двойным гауссовым распределением:

$$f(x, y) = \frac{\exp \left[-\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y - y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]}{2\pi\sigma_x\sigma_y}, \quad (1)$$

где (x_0, y_0) – точка пересечения оси пучка с плоскостью облучения xy ; σ_x, σ_y – горизонтальное и вертикальное г.т.с. отклонения от оси соответственно. Задача выбора способа и положения границ области перемещения пучка состоит в определении временной зависимости параметров x_0, y_0 , при которых обеспечивается допуск на равно-

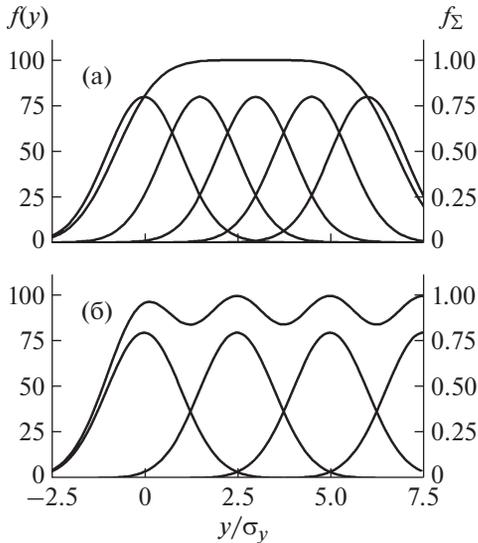


Рис. 3. Неравномерность облучения: а – при расстоянии между строками $a = 1.5\sigma_y$; б – при $a = 2.5\sigma_y$.

мерность распределения флюенса по поверхности облучаемого объекта.

В случае бесконечной длины строки перемещения следа пучка интенсивностью I_B со скоростью v вдоль оси x в бесконечных пределах образуются одинокая строка облучения в виде гребня гауссова профиля. При пробеге параметром y_0 ряда значений: $0, a, 2a, \dots, (n - 1)a$, где a – дистанция между строками, вся площадь S_{scan} объекта будет покрыта n строками, и из (1) следует распределение флюенса:

$$\Phi_{ns} = \frac{I_B}{v} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(y - ia)^2}{2\sigma_y^2} \right]. \quad (2)$$

Здесь параметр I_B/v есть вклад каждой строки в линейную плотность распределения флюенса; результирующая линейная плотность равна nI_B/v .

При небольшой величине расстояния a профиль функции Φ_{ns} , согласно рис. 3а, имеет почти плоскую вершину. С возрастанием a плотность флюенса падает в промежутках между строками. При $a = 2.5\sigma_y$, неравномерность $\delta f_{\Sigma} = (\Phi_{ns} - \Phi_{ns_max})/\Phi_{ns_max}$ достигает допуска величиной 15%, назначенного для этого источника неоднородности (рис. 3б).

Если, например, выбрать $\sigma_y = 10$ мм, то максимальное расстояние между строками следует ограничить величиной $a < 2.5\sigma_y = 25$ мм, при этом число строк, покрывающих $L_S = 200$ мм, должно быть $n > 8$.

В случае конечной длины строки интегрирование (1) в конечных пределах показывает, что уровню 85% на фронте строки соответствует координата, удаленная от координаты оси стартового поло-

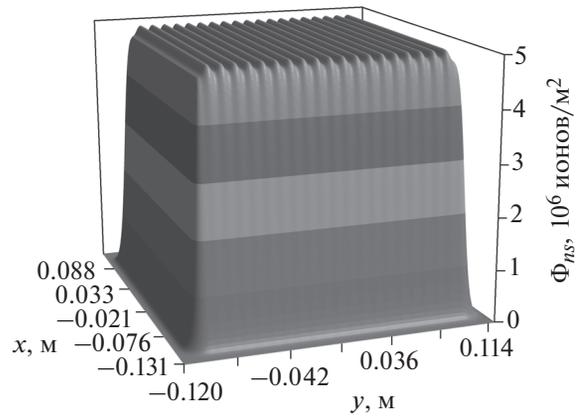


Рис. 4. Распределение флюенса на мишени.

жения на $\sim\sigma_x$ внутрь строки. Поэтому длина L_I , по которой перемещается ось пучка, должна быть не менее чем на $\sim 2\sigma_x$ больше длины L_S облучаемого образца: $L_I \geq L_S + 2\sigma_x$, так что распределение флюенса в этом случае имеет вид

$$\Phi_{ns} = \frac{I_B}{2v} \operatorname{erf}(\xi) \Big|_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{\exp \left[-\frac{(y + l_S - ia)^2}{2\sigma_y^2} \right]}{\sigma_y \sqrt{2\pi}}, \quad (3)$$

где

$$\xi_{\min} = \frac{x - l_S - \sigma_x}{\sqrt{2}\sigma_x}; \quad \xi_{\max} = \frac{x + l_S + \sigma_x}{\sqrt{2}\sigma_x}.$$

На рис. 4 приведен пример распределения флюенса при облучении объекта пучком с параметрами $\sigma_x = \sigma_y = 5$ мм и интенсивностью $I_B = 10^6$ ионов/с. Число строк однократного сканирования $n = 21$. След пучка перемещается по поверхности S_{scan} со скоростью $v = 200$ мм/с (см. табл. 1). В этом случае создается резерв времени около 0.5 с на каждую строку для перевода пучка на следующую строку, осуществляемого за пределами объекта облучения.

При рассмотрении непрерывного и мультикадрового облучения мишени предельное распределение флюенса возникает при фиксированном времени T_k одного полного кадра и безграничном возрастании числа строк, $n \rightarrow \infty$. Тогда

$$\Phi_{пред}(x, y) = \frac{I_B T_k}{4L_I^2} \operatorname{erf}(\xi) \Big|_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \operatorname{erf}(\eta) \Big|_{\eta_{\min}}^{\eta_{\max}}, \quad (4)$$

$$\text{где } \eta_{\min} = \frac{y - l - \sigma_y}{\sqrt{2}\sigma_y}; \quad \eta_{\max} = \frac{y + l + \sigma_y}{\sqrt{2}\sigma_y}.$$

Практически приблизиться к предельному распределению (4) возможно только за счет повышения скоростных и предельно допустимых электрических характеристик сканера и его ис-

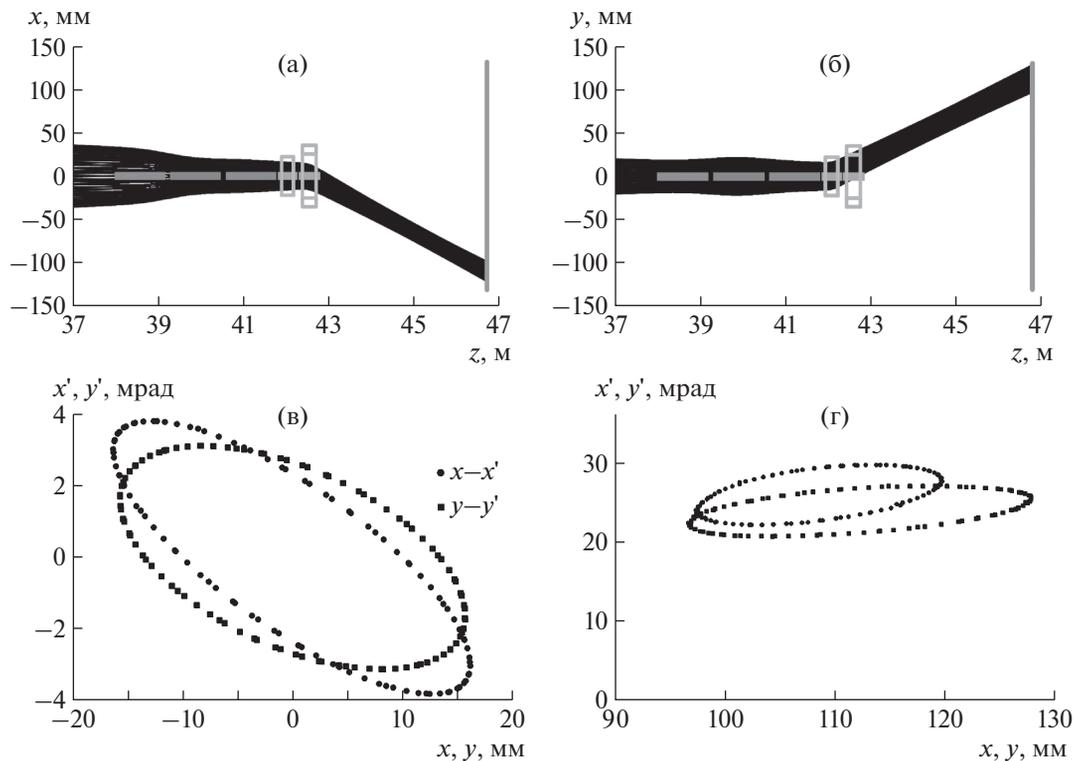


Рис. 5. Транспортировка пучка к объекту облучения: момент сканирования на максимальные углы для НДМ (а) и для VDM (б); фазовые портреты пучка на входе сканера (в) и его выходе (г).

точника питания. При этом часто [2] приходится значительно снижать величину поля и увеличивать длину сканера.

При многократном облучении площади S_{scan} влияние флуктуаций интенсивности пучка во времени уменьшается. Распределение полного флюенса в этом режиме по форме идентично (4): $\Phi_k = k \Phi_{пред}$, где k – число однотипных кадров.

ДИНАМИКА ПУЧКА В СКАНЕРЕ

На рис. 5 показан результат численного моделирования динамики пучка ионов $^{197}\text{Au}^{59+}$ в режиме: $L_D = 4.0$ м, эмиттанс $40 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$.

Согласующий квадрупольный триплет (с.т.), предшествующий сканеру, оптимизируется по достижении удовлетворительного компромисса между размерами пучка в НДМ и на объекте. Пара диполей сканера наиболее компактна. Их возбуждение соответствует полям до $B_1 = 1.31$ Тл, $B_2 = 1.20$ Тл и обеспечивает поворот пучка на максимальные углы в обеих плоскостях (рис. 5а, 5б). При этом кроссовер занимает положение вблизи плоскости объекта (рис. 5в, 5г). (Для удобства сравнения на диаграмме рис. 5г выходной фазовый портрет $x-x'$ отражен симметрично по x и x' .)

МАГНИТЫ СКАНЕРА И ТРИПЛЕТА

Разработка диполей сканера проводилась комплексно: параллельно с расчетами динамики ионного пучка в с.т. (рис. 5а, 5б) и процесса покрытия сканером площади S_{scan} . Эта процедура состояла в коррекции геометрических и магнитных параметров триплета и сканера для обеспечения надлежащего прохождения пучка через VDM и НДМ: отклонении ионного пучка на необходимые углы при одновременном снижении габаритных размеров магнитов и минимизации размеров пучка на объекте. В результате оптимизации VDM и

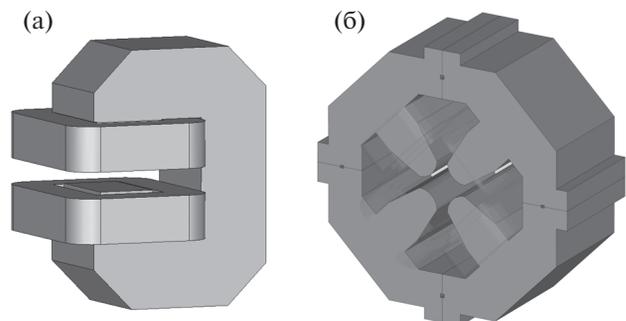


Рис. 6. Оптимизированные диполь сканера (а) и квадруполь с.т. (б).

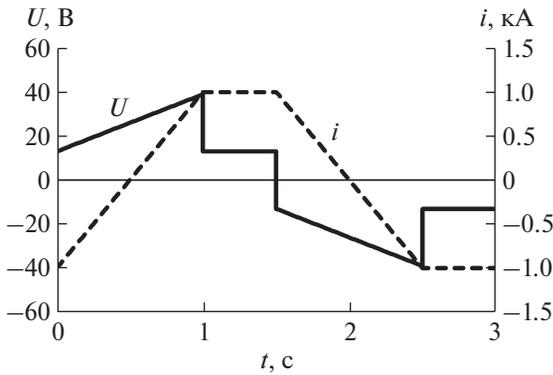


Рис. 7. Изменение тока возбуждения и напряжения на обмотке HDM сканера.

HDM получены наиболее компактные диполи. Конструкция обоих магнитов, изображенная на рис. 6а, однотипная, а их параметры приведены в табл. 3.

Диполи в канале расположены на минимальном расстоянии друг от друга: расстояние между их полюсами 210 мм, а между обмотками 10 мм. Согласующий квадрупольный триплет позволяет снизить диаметр пучка с эмиттансом $\epsilon_x = \epsilon_y = 40 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ в триплете до ≤ 70 мм; апертура квадруполей в с.т. должна быть $\geq \varnothing 80$ мм.

На рис. 6б изображен общий вид квадрупольного магнита с эффективной длиной 330 мм и апертурой (под пучок) 70 мм, основные параметры магнита приведены в табл. 4.

РЕЖИМ ПИТАНИЯ СКАНЕРА

Реактивная компонента L импеданса электромагнитов, используемых в каналах транспортировки, часто имеет существенную величину, из-за чего постоянная времени τ этих магнитов обычно сравнима (или превышает) с длительностью T_s импульсов тока возбуждения, требующейся для формирования строки. Поэтому для линейного изменения тока в нагрузке с неизменной индуктив-

ностью в диапазоне токов $i(t) \in [-I_m, I_m]$ напряжение $U(t)$ источника в течение промежутка времени T_s должно быть линейной функцией времени:

$$U(t) = R_D I_m \frac{t + \tau - T_s/2}{T_s/2}.$$

На рис. 7 показаны диаграммы изменения тока возбуждения и напряжения на обмотке HDM такого сканера при $I_m = 1$ кА, $\tau = T_s = 1$ с, $R_D = 13$ мОм, $L = 13$ мГ.

По окончании перемещения следа пучка вдоль строки выполняется переход на следующую строку, когда напряжение $U(t)$ на HDM поддерживается неизменным и равным напряжению на активной составляющей R_D импеданса электромагнита. В течение этого времени выполняется перемещение положения следа пучка в вертикальном направлении с помощью VDM.

Для снижения базового расстояния L_B в нашем сканере принят достаточно высокий уровень поля — до 1.5 Тл (номинальное значение составляет 1.3 Тл). Вследствие нелинейности намагничивания магнитопровода диполей при линейном режиме питания сканера на краях строк возникнет замедление развертки пучка; скорость сканирования v может снизиться вдвое, если применяются электротехнические стали с невысокой индукцией насыщения. В результате существенно повышается неоднородность облучения образца, обусловленная обратной зависимостью (3) плотности флюенса от скорости v . Для снижения влияния этого фактора предусматривается питание сканера от источника с регулируемым во времени выходным напряжением. Это позволяет увеличить скорость изменения тока возбуждения диполей в окрестностях точек поворота и выровнять ее со скоростью облучения центральной зоны исследуемого образца.

ВЫВОДЫ

Для решения широкого круга прикладных задач выполнен расчет компактного магнитного

Таблица 3. Параметры магнитов сканера

| Параметры магнитов | VDM | HDM |
|---|-----|-----|
| Длина полюса, мм | 280 | 320 |
| Диаметр апертуры, мм | 44 | 70 |
| B_{\max} при максимальном возбуждении, Тл | 1.5 | 1.5 |
| I_m , ток возбуждения (максимальный), кА | 1 | 1 |
| R_D обмотки магнита, мОм | 6 | 13 |
| L магнита, мГ | 4 | 13 |
| τ магнита, с | 0.8 | 1.1 |
| Область 0.5%-ной однородности поля, мм | 40 | 50 |

Таблица 4. Параметры квадрупольного магнита

| | |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Максимальный градиент, Тл/м | 22 |
| Апертура и ее рабочая часть, мм | $\varnothing 80/\varnothing 70$ |
| Ток возбуждения (максимальный), А | 500 |
| Нелинейность поля в рабочей области | $< 5 \cdot 10^{-3}$ |
| Число витков на полюс | 31 |
| Размеры шинки, мм | $10 \times 10 \times \varnothing 6$ |
| Плотность тока, А/мм ² | 7 |
| Длина сердечника/габаритная, мм | 280/380 |
| Габариты (ширина/высота), мм | 700 × 700 |

сканера и режимов его работы для однородного облучения пучком т.з.ч. исследуемых мишеней размером до 200×200 мм, с отношением заряда к массе $Z/A = 0.3-0.5$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Butenko A., Kozlov O., Syresin E., Trubnikov G., Bakhmutova A.V., Bogdanov A.V., Gavrilin R., Golubev A., Kantsyrev A.V., Liakin D.A., Markov N.V., Panyushkin V.A., Skachkov V., Skobljakov A., Visotski S.A.* // Proc. of IP-AC2017. Copenhagen, Denmark. accelconf.web.cern.ch/AccelConf/ipac2017/papers/tupva114.pdf
2. *Гикал Б.Н., Горбачев Е.В., Казаринов Н.Ю., Казача В.И., Казача Г.С., Лебедев Н.И., Макаров А.А., Мельников В.А., Миронов В.И., Рабиун С.В., Фатеев А.А.* // Письма в ЭЧАЯ. 2005. Т. 2. № 3 (126). С. 97. http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_3_2005/17_gik.pdf
3. *Haberer Th., Becher W., Schardt D., Kraft G.* // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. 1993. V. A330. P. 296.
4. *Kohno R., Hotta K., Dohmae T., Matsuzaki Y., Nishio T., Akimoto T., Tachikawa T., Asaba T., Inoue J., Ochi T., Yamada M., Miyanaga H.* // International Journal of Particle Therapy. 2017. V. 3. № 4. P. 429. <https://doi.org/10.14338/IJPT-16-00017.1>