

P9-2007-60

О. В. Савченко

ПРЕДЛОЖЕНИЕ И ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБОСНОВАНИЕ ВАРИАНТА УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ
НОВОГО ТИПА ДЛЯ МЕДИКО-ТЕХНИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА **ЛЯП ОИЯИ**

Савченко О. В.	P9-2007-60
Предложение и физико-техническое обоснование варианта ускорителя протонов нового типа для медико-технического комплекса ЛЯП ОИЯИ	
<p>Предложен ускоритель протонов нового типа (фазотрон с разделенным магнитом или рециркуляционный фазотрон), в котором магнитное поле в отклоняющих магнитах является постоянным, а частота ускоряющего электрического поля и градиенты магнитного поля в фокусирующих линзах изменяются во время цикла ускорения по заданным программам.</p>	
<p>Проведен анализ траекторной сопряженности, а также фазовой, пространственной и резонансной устойчивости заряженных частиц в новом ускорителе, позволяющий сделать вывод о принципиальной возможности его создания.</p>	
<p>Такие особенности нового ускорителя, как быстроцикличность (50–100 Гц) и возможность изменять энергию и количество частиц в каждом цикле ускорения, наиболее полно соответствуют клиническим требованиям к протонным пучкам, особенно при использовании перспективных методов активного формирования дозных полей. Предложен технический вариант реализации нового ускорителя в здании медико-технического комплекса ЛЯП ОИЯИ.</p>	
<p>Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.</p>	
<p>Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2007</p>	

Перевод авторов

Savchenko O. V.	P9-2007-60
The Proposal and Physico-Technical Feasibility Studies of an Accelerator of New Type for the Medico-Technical Complex of the LNP, JINR	
<p>A proton accelerator of new type (a phasotron with a divided magnet or a recirculation phasotron), in which the magnetic field in bending magnets is constant and the frequency of the accelerating electrical field and the gradient of the magnetic field in focusing lenses vary during the acceleration cycle according to preset programs, is proposed.</p>	
<p>The analysis of consistency of trajectories as well as of phase, transverse and resonance stability, which allows making a conclusion about the principal possibility of realizing such an accelerator, is carried out.</p>	
<p>Some particularities of the new accelerator such as speed cycles (50–100 Hz) and the possibility to vary the energy and the number of particles in each acceleration cycle are the most suitable clinical requirements on proton beams, particularly while using perspective methods of active formation of dose fields.</p>	
<p>A proposal on technical feasibility of realization of a new accelerator within the building of the Medico-Technical Complex of the LNP, JINR, is made.</p>	
<p>The investigation has been performed at the Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.</p>	
<p>Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2007</p>	

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время медицинские протонные пучки с энергией 85–250 МэВ для использования в процедурных кабинах медико-технического комплекса (МТК) ЛЯП ОИЯИ получают путем торможения выведенного из фазотрона ЛЯП ОИЯИ протонного пучка с энергией 660 МэВ и интенсивностью около 2,5 мкА.

При таком способе генерации протонных пучков в процедурные кабины МТК удастся довести заторможенные пучки с интенсивностью не более 1 нА. Энергетическая мощность таких пучков составляет всего около четверти ватта, в то время как мощность выведенного пучка протонов приближается к 1,5 кВт, а суммарная мощность, потребляемая фазотроном, достигает 3000 кВт, т. е. в 10^7 раз больше. Столь низкий коэффициент преобразования затраченной энергии в энергию используемого терапевтического пучка протонов возможно будет в будущем значительно повысить в интенсивно разрабатываемых плазменных ускорителях на основе мощных импульсных лазеров, где уже сейчас получены протоны, ускоренные до граничной энергии около 20 МэВ при коэффициенте преобразования энергии порядка 1 % [1].

Однако, по мнению самих разработчиков, надежно управляемые плазменные ускорители появятся не ранее чем лет через 20 или позднее, поэтому в ближайшие 5–10 лет для МТК ЛЯП ОИЯИ единственной альтернативой снижения энергозатрат будет оставаться развитие, совершенствование и использование вместо фазотрона специализированных медицинских ускорителей, основанных на традиционных методах ускорения.

Для замены фазотрона на ускоритель с меньшим (примерно на порядок) потреблением энергии в настоящее время имеется несколько предложений.

Протонный синхротрон [2] имеет ряд преимуществ, обусловленных низким (до 100 кВт) энергопотреблением и возможностью изменения энергии в каждом цикле ускорения. Однако он имеет также и такие существенные недостатки, как низкая (порядка 1 Гц) частота циклов ускорения и сложность в настройке и управлении.

Изохронный циклотрон [3, 4] на энергию 190–230 МэВ обладает низким (100–200 кВт) энергопотреблением и сравнительной простотой в управлении, однако он имеет фиксированную энергию ускоренных протонов, что приводит

к необходимости создания дополнительных устройств для торможения протонов и повышению (примерно на два порядка) интенсивности внутреннего ускоренного пучка, значительно ухудшающих радиационную обстановку внутри и вокруг ускорителя. Кроме того, оценочная стоимость этих ускорителей составляет 5–7 млн долл. США, что при существующем уровне финансирования в ОИЯИ отодвигает их реализацию на неопределенное время.

Целью настоящей работы является предложение и физико-техническое обоснование принципиальной возможности создания ускорителя, свободного от недостатков протонного синхротрона и изохронного циклотрона. Такой ускоритель, в котором частота циклов составляет 50–100 Гц, а энергию (в пределах 70–230 МэВ) и интенсивность (в диапазоне 0,1–2 нА) можно будет задавать и менять в каждом цикле ускорения, был бы наиболее близок к идеальному ускорителю, удовлетворяющему всем рекомендованным клиническим требованиям [5] и обеспечивающему в режиме активного формирования дозных полей доведение каждой группы ускоренных протонов до заданного места в опухолевом объеме пациента. Причем стоимость его реализации может оказаться существенно меньшей за счет использования готовых деталей, имеющихся разработок магнитных элементов и стандартного промышленного оборудования.

1. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕДЛАГАЕМОГО УСКОРИТЕЛЯ

Общая схема ускорителя нового типа представлена на рис. 1.

Основное отличие предлагаемого ускорителя состоит в том, что магнит ускорителя разделен на две части, выполняющие роль магнитных зеркал, разнесенных на расстояние, позволяющее установить в промежутке, свободном от магнитного поля, все необходимые системы управления и контроля за ускорителем. Заряженные частицы, образованные в источнике ионов, поступают в инжектор, где ускоряются до энергии в несколько МэВ, затем с помощью импульсного магнита (ИМ) переводятся на первую орбиту ускорителя, отражаются магнитным зеркалом (МЗ) № 1, отклоняются малым поворотным магнитом (ОМ), фокусируются линзой (ФЛ), попадают в прямолинейный промежуток с ускоряющей системой (УС), далее снова фокусируются и отклоняются линзами (ФЛ), магнитными зеркалами (МЗ) и отклоняющими магнитами (ОМ), циркулируя по замкнутым орбитам, показанным на рис. 1 сплошными линиями, и приобретая при каждом обороте энергию от ускоряющего поля в несколько кэВ.

По достижении заданной энергии включается ударный магнит (УМ) и отклоненные частицы за время, меньшее времени одного оборота, выводятся из ускорителя по траекториям, показанным пунктирными кривыми, и после отклонения поворотным магнитом (ПМ) попадают в процедурные кабины для облучения пациентов. Магнитное поле в магнитных зеркалах (МЗ) и откло-

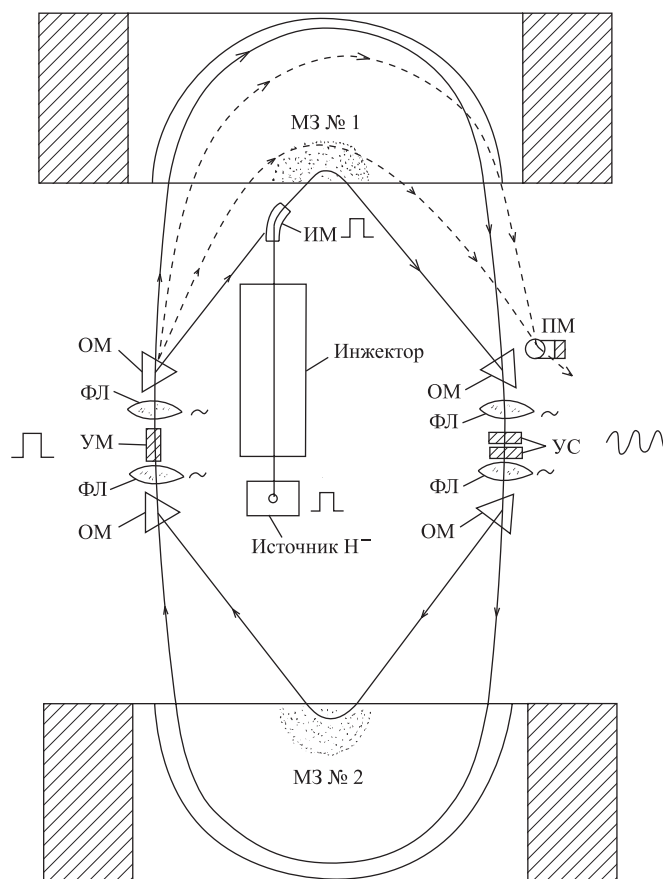


Рис. 1. Общая схема предлагаемого ускорителя протонов нового типа для протонной терапии (пояснения в тексте)

няющих магнитах (ОМ) является стационарным, а магнитное поле в фокусирующих линзах (ФЛ) изменяется за время каждого цикла ускорения таким образом, чтобы сохранялась горизонтальная и вертикальная фокусировка ускоряемых протонов с учетом фокусировки в постоянных магнитных полях всех отклоняющих магнитов.

При этом частота ускоряющего поля будет переменной величиной и должна изменяться во время цикла ускорения таким образом, чтобы равновесная фаза высокочастотного поля оставалась постоянной величиной.

Для обеспечения процесса ускорения протонов в предложенном варианте ускорителя должны быть выполнены определенные условия по точному

сопряжению траекторий движения частиц в отклоняющих магнитах и магнитных зеркалах, а также фазовой, пространственной и резонансной устойчивости частиц для выбранной конфигурации магнитных полей. Подробно эти условия рассматриваются ниже.

2. СОПРЯЖЕНИЕ ТРАЕКТОРИЙ В ОТКЛОНЯЮЩИХ МАГНИТАХ И МАГНИТНЫХ ЗЕРКАЛАХ

Требование этого пункта состоит в том, чтобы пучок протонов с импульсом (P) отклонялся магнитом (OM) таким образом, чтобы попасть на вход магнитного зеркала в точку, отстоящую от центра на расстояние $x = r \cos \beta$, где r — радиус кривизны протонов в поле B_0 магнитного зеркала — определяется из соотношения $PC = 300H_0r$, а β — угол между траекторией протонов и перпендикуляром ко входной границе магнитного зеркала. Если в качестве магнита (OM) использовать только один магнит, то выполнить это требование путем профилирования границы полюса этого магнита не представляется возможным для пучков протонов с диаметром более 0,5 см. Необходимо использовать комбинацию по крайней мере из двух магнитов, первый из которых пространственно раздвигает траектории протонов с различными импульсами, а уже второй магнит с профилированным полюсом воздействует на выделенную траекторию таким образом, что направляет ее в расчетную точку на входе магнитного зеркала. Один из возможных вариантов комбинации двух магнитов, полученный на основе приближенных расчетов и дающий представление о примерной форме профилированного полюса второго магнита, представлен на рис. 2, где показаны сопряженные траектории пучков протонов с импульсами, отличающимися более чем на порядок. При проектировании предложенного ускорителя все необходимые расчеты формы и размеров профилированных полюсов должны быть выполнены на ЭВМ с точностью не хуже чем 10^{-3} для сопряжения (в пределах 1–2 мм) траекторий в отклоняющих магнитах и магнитных зеркалах.

3. ФАЗОВАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕНИЯ

Постоянное во времени магнитное поле в магнитных зеркалах и отклоняющих магнитах определяет динамику движения протонов в предложенном ускорителе как аналогичную динамике в обычных циклических ускорителях.

Поэтому условие, обеспечивающее ускорение протонов без потерь, как и в фазотронах, сводится к требованию сохранения постоянства равновесной фазы в процессе ускорения. И основные фазовые параметры предложенного

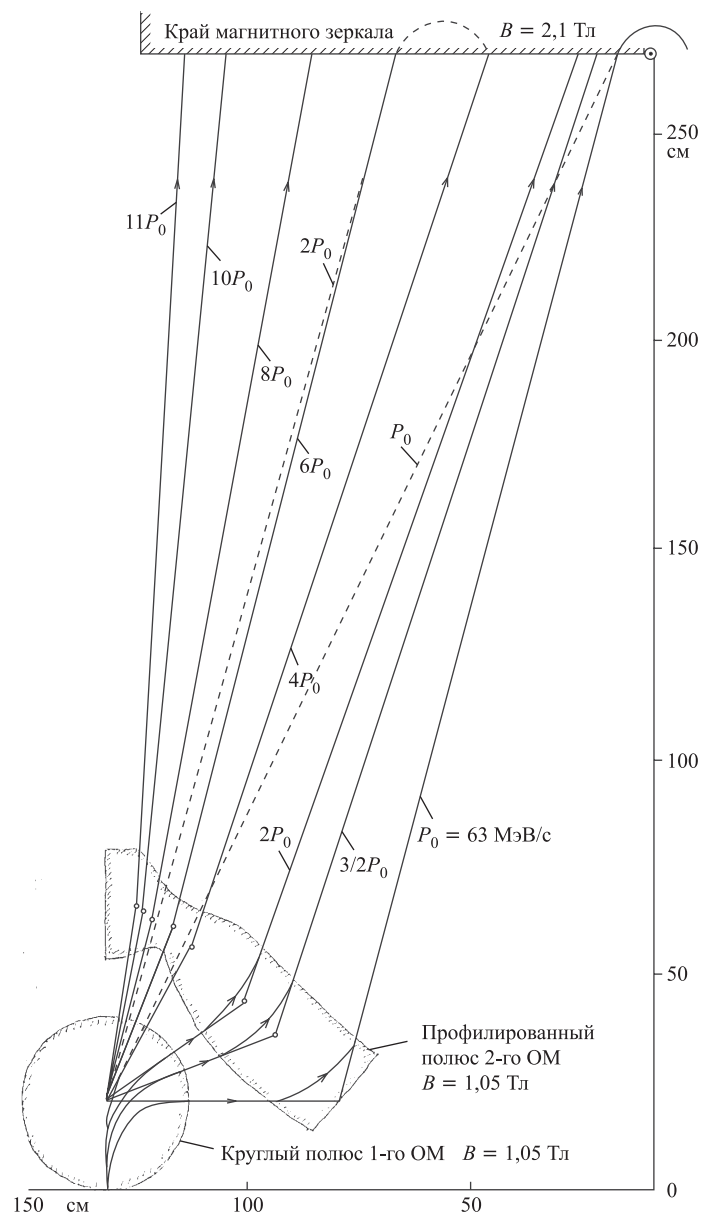


Рис. 2. Сопряжение траекторий в отклоняющих магнитах и магнитном зеркале

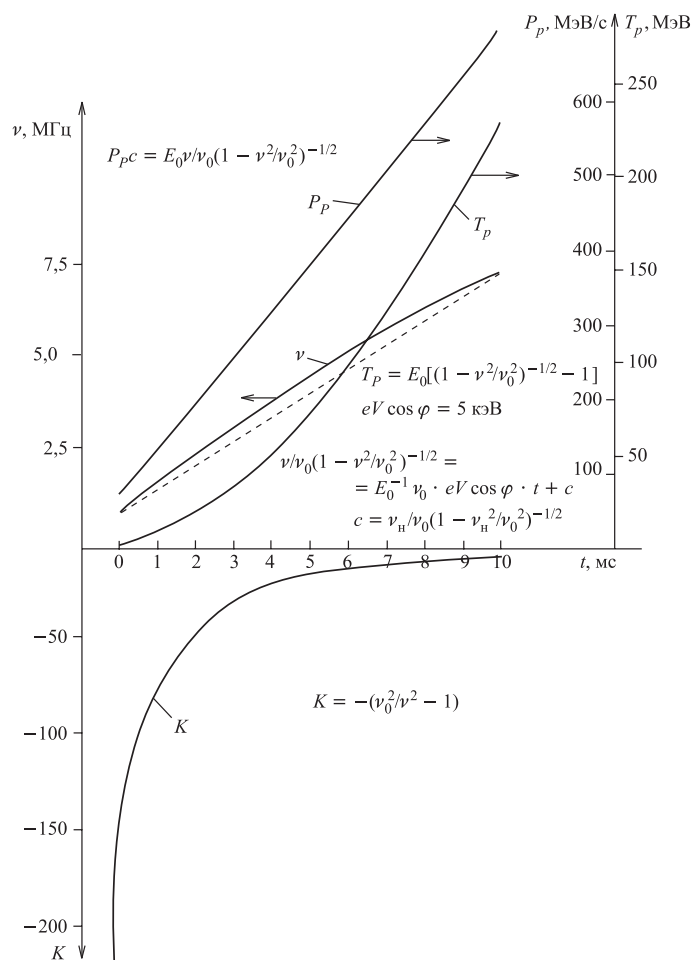


Рис. 3. Параметры ускорителя, обеспечивающие постоянство равновесной фазы (фазовая устойчивость)

ускорителя могут быть вычислены по некоторым общим формулам, полученным в работе [6] для циклических ускорителей. На рис. 3 представлены результаты расчета частотной характеристики, энергии, импульса и фактора автофазировки в зависимости от времени ускорения для варианта предложенного ускорителя с одинаковой длиной всех траекторий $L = 24,0$ м, начальной энергией 2,1 МэВ, конечной энергией 230 МэВ и приростом энергии за один оборот $eV \cos \varphi = 5$ кэВ. Эти параметры примерно соответствуют параметрам технического варианта предложенного ускорителя, изображенного на

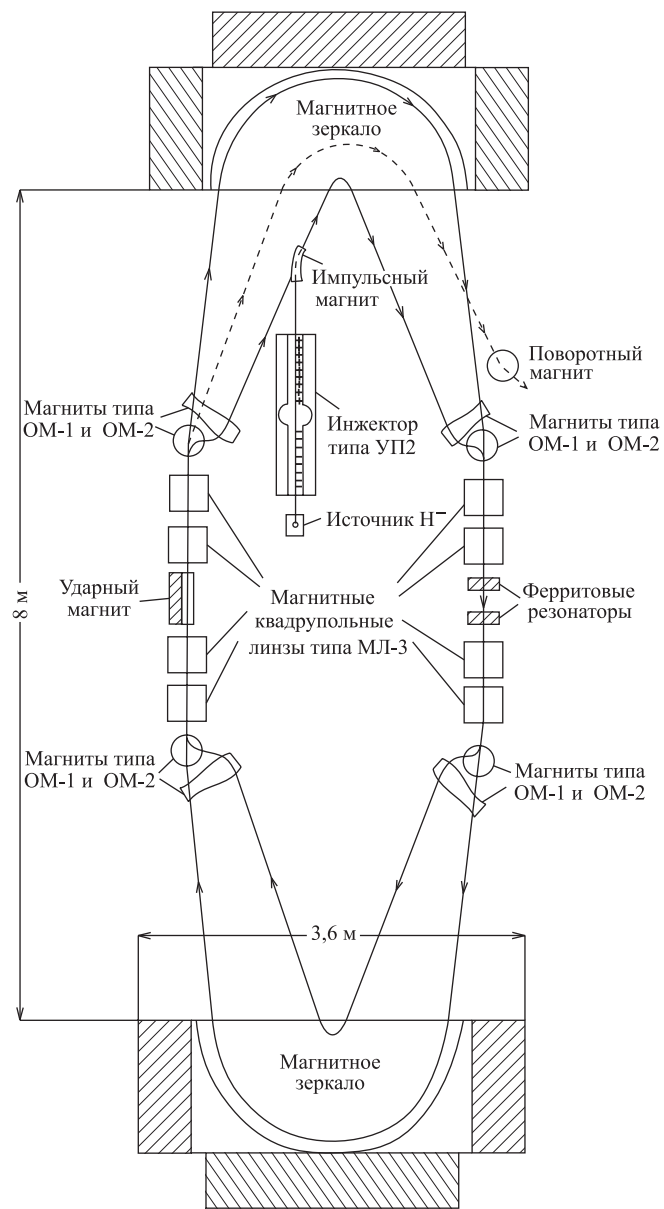


Рис. 4. Технически реализуемый вариант предложенного ускорителя

рис. 4. В этом случае частота ускоряющего поля ν определяется выражением $\nu = \nu_0 \beta$, где $\nu_0 = C/L = 12,5$ МГц, а $\beta = V/C$ и решение для частотно-временной зависимости получается в аналитическом виде

$$\nu/\nu_0 \cdot (1 - \nu^2/\nu_0^2)^{-1/2} = E_0^{-1} (\nu_0 e V \cos \varphi) t + a,$$

где $a = \nu_n/\nu_0 (1 - \nu_n^2/\nu_0^2)^{-1/2}$ — константа интегрирования, и откуда уже легко вычисляются энергия, импульс и фактор автофазировки (K) в зависимости от времени ускорения.

Частотная характеристика является растущей и почти линейно изменяется от начальной частоты $\nu_n = 0,84$ МГц до конечной частоты $\nu_k = 7,4$ МГц (примерно в 9 раз), а время ускорения составляет около 10 мс.

При удвоении ускоряющего напряжения до $V \cos \varphi = 10$ кВ время ускорения сокращается до 5 мс. Фактор автофазировки (K) во всем диапазоне изменения частот является отрицательным, что означает устойчивость фазовых колебаний на левой полуволне ускоряющего напряжения. При этом критическая энергия, где фактор автофазировки обращается в нуль, находится далеко за пределами максимальной энергии рассматриваемого ускорителя, равной -230 МэВ.

4. ПОПЕРЕЧНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ (ФОКУСИРОВКА) ЧАСТИЦ В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕНИЯ

Поперечная устойчивость движения протонов в предложенном ускорителе будет определяться общими критериями устойчивости движения частиц в периодических магнитных системах транспортировки [7].

Если M — матрица элемента периодической магнитной системы, то движение будет устойчивым, если след (шпур) матрицы $|\text{Sp } M| < 2$. При этом аксептанс канала определяется выражением

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2}{u_{12}} \sqrt{1 - \frac{|\text{Sp } M|^2}{4}} = \frac{\pi R^2}{u_{12}} \sqrt{1 - \frac{(u_{11} + u_{22})^2}{4}},$$

где u_{ik} — элементы матрицы

$$M = \begin{vmatrix} u_{11} & u_{12} \\ u_{21} & u_{22} \end{vmatrix}.$$

В предложенном ускорителе оценку области устойчивости для наиболее критичного случая, когда импульс минимальный (≈ 63 МэВ/с) и угол входа пучка в магнитное зеркало максимален и составляет $\beta = 30^\circ$, можно получить в предположении, что линзы (ФЛ) являются тонкими и размещены в середине

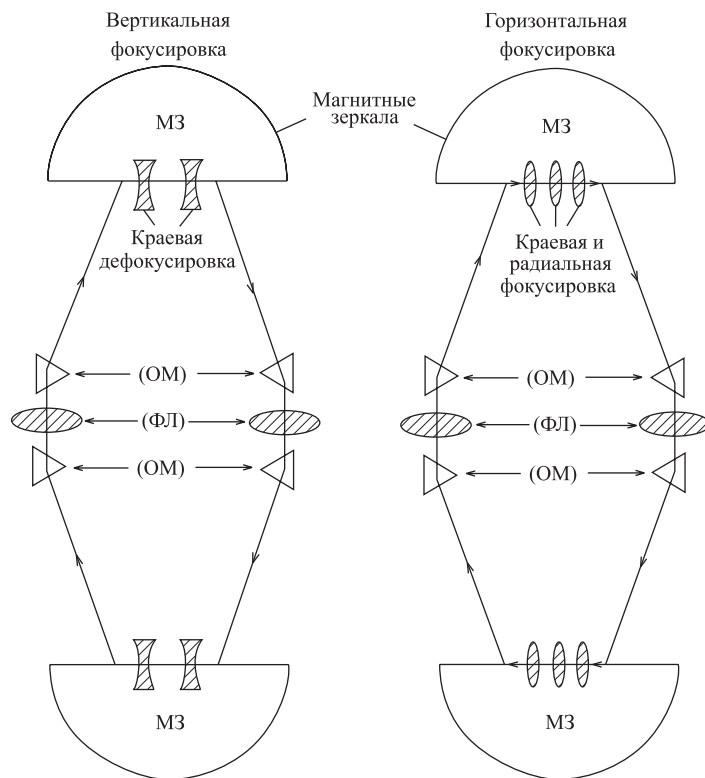


Рис. 5. Схема элементов периодичности магнитной системы ускорителя для анализа поперечной устойчивости (фокусировки) заряженных частиц в процессе ускорения

прямолинейного промежутка между двумя отклоняющими магнитами (ОМ), как это показано на рис. 5.

В случае вертикальной фокусировки передняя граница магнитного зеркала действует как тонкая дефокусирующая линза с оптической силой $\text{tg } \beta / r_0 = \text{tg } 30^\circ / 10$, где $r_0 = 10$ см — радиус кривизны протона с импульсом 63 МэВ/с в магнитном поле $B_0 = 2,1$ Тл магнитного зеркала. Матрица перехода через две границы магнитного зеркала определяется как

$$M_{\text{Вц}} = \begin{vmatrix} 2,21 & 21 \\ 0,185 & 2,21 \end{vmatrix},$$

и полная матрица элемента периодичности магнитной системы ускорителя запишется как

$$M_B = M_1 \cdot M_2 \cdot M_{\text{Вц}} \cdot M_2 \cdot M_1,$$

где $M_1 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 1/2 P_1 & 1 \end{vmatrix}$ — матрица фокусирующей линзы (ФЛ) с оптической силой $P_1 = 1/F_1$ и фокусным расстоянием F_1 , $M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 400 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$ — матрица дрейфового промежутка от линзы (ФЛ) до границы магнитного зеркала.

Акцептанс периодической магнитной системы для этого случая будет определяться выражением

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2}{790} \sqrt{(\Delta - 0,0323)(0,0831 - \Delta)},$$

где $R = 5$ см — апертура линзы (ФЛ), $400 \cdot P_1 = 400/F_1 = -V_1 = 2 - \Delta$ и $\varepsilon = \varepsilon_{\max} \approx \pi \cdot 0,8$ см · мрад для $\Delta = 0,0254$ и $\varepsilon = 0$ при $\Delta_1 = 0,0323$ и при $\Delta_2 = 0,0831$, т.е. область допустимого изменения оптической силы линзы (ФЛ) не превысит 1 %.

При увеличении импульса до максимального значения ≈ 700 МэВ/с область допустимых изменений $F_1 = 370/V_1$ существенно расширяется и акцептанс периодической системы становится равным

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2 \cdot 1,765}{1303} \sqrt{(V_1 - 0,272)(1,41 - V_1)}.$$

При $V_1 = 0,84$ $\varepsilon = \varepsilon_{\max} = \frac{\pi \cdot 25 \cdot 0,5}{740} \approx \pi \cdot 19$ см · мрад, т.е. $V_1 = 0,84 \pm 0,57$ и оптическая сила линзы (ФЛ) может изменяться на несколько десятков процентов при сохранении вертикальной устойчивости движения частиц.

В случае горизонтальной фокусировки и минимального импульса матрица перехода через две границы магнитного зеркала запишется как

$$M_{\Gamma\Gamma} = \begin{vmatrix} -1 & 8,66 \\ 0 & -1 \end{vmatrix}$$

и полная матрица элемента периодической системы будет

$$M = M_1 \cdot M_2 \cdot M_{\Gamma\Gamma} \cdot M_2 \cdot M_1,$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2}{791} \sqrt{0,9892 V_1 (2 - 0,9892 V_1)},$$

где $V_1 = -\frac{400}{F_1}$, и при $V_1 \approx 1 \pm 1$ $\varepsilon_{\max} = \frac{\pi \cdot 25}{791} \cdot 1 = \pi \cdot 32$ см · мрад, т.е. допускается 100 %-е изменение оптической силы линзы (ФЛ).

При увеличении импульса до максимального значения ситуация с допустимыми пределами оптической силы линзы (ФЛ) практически не меняется:

$$\varepsilon = \frac{\pi R^2}{750} \sqrt{0,986V_1 (2 - 0,986V_1)},$$

где $V_1 = -\frac{370}{F_1} \approx 1 \pm 1$ и $\varepsilon_{\max} = \pi \cdot 33 \text{ см} \cdot \text{мрад}$.

Таким образом, для выполнения условий поперечной устойчивости наиболее критичным является случай вертикальной фокусировки для наименьшего импульса, когда дефокусирующее действие на границе магнитного зеркала является максимальным. Допустимые пределы изменения оптической силы линзы (ФЛ) в этом случае увеличатся примерно в 2,5 раза, если угол β пересечения границы магнитного зеркала уменьшится с 30° примерно до 15° , как это следует из рис. 2 для сопряженных траекторий с минимальным импульсом $P_0 = 63 \text{ МэВ}/c$. Кардинально изменить эти пределы в большую сторону можно будет путем создания области (выделенной на рис. 1 точками) неоднородного магнитного поля с показателем спада $n \approx 0,5$ в диапазоне радиусов от $r_0 = 10$ до $r \approx 30$ см. В этом случае возникает значительная вертикальная фокусировка с оптической силой $\approx 1/r_0$, почти полностью компенсирующая вертикальную дефокусировку на границе магнитного зеркала. Кроме того, небольшим (до 5 %) расширением межполюсного зазора от передней границы магнитного зеркала к противоположному краю при сохранении плоской поверхности полюса можно создать слабую вертикальную фокусировку во всем объеме межполюсного зазора и обеспечить тем самым дополнительную вертикальную устойчивость во всем диапазоне изменения импульсов ускоряемых частиц.

5. НЕДОПУЩЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ БЕТАТРОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ (РЕЗОНАНСНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ)

Частота бетатронных колебаний при движении частиц в периодичной магнитной системе определяется выражением [7]

$$Q = \mu N / 2\pi,$$

где $\mu = \pm \arccos(\text{Sp } M/2)$, N — число элементов периодичности при одном обороте (для рассматриваемого ускорителя $N = 2$), M — матрица одного элемента периодичной магнитной системы.

Если $Q = 0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0$ и т. д., то движение становится неустойчивым, амплитуда поперечных колебаний возрастает до недопустимых значений и частицы теряются на стенках вакуумной камеры ускорителя. Кроме

того, для исключения разностных резонансов $Q_{\text{верт}}$ нигде не должна равняться $Q_{\text{гориз}}$, $Q_{\text{гориз}} - 2Q_{\text{верт}} \neq 0$ и $2Q_{\text{верт}} - Q_{\text{верт}} \neq 0$.

В приведенных расчетах вертикальных и горизонтальных фокусировок $Q = 0,5$ при значениях V_1 , отвечающих максимуму акцептанса периодической магнитной системы, и $Q = 0$ и $1,0$ при значениях V_1 , при которых акцептанс обращается в нуль.

Поэтому оптимальными значениями Q будет в случае вертикальной фокусировки $Q_{\text{верт}} \approx 0,55-0,65$, а в случае горизонтальной фокусировки $Q_{\text{гориз}} \approx 0,35 - 0,45$ при выборе соответствующих значений V_1 , позволяющих определить необходимые значения градиентов магнитных полей в линзах (ФЛ). Однако эти значения являются только иллюстрацией к принципиальной возможности такого определения.

Детальные расчеты на ЭВМ по поперечной устойчивости частиц и определению точных значений границ допустимых изменений V_1 должны быть сделаны при выборе какого-либо технического варианта ускорителя и параметров всех его магнитных элементов.

6. ТЕХНИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗУЕМОСТЬ ПРЕДЛОЖЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ

Общий вид технически реализуемого варианта предложенного ускорителя, в котором используются только хорошо известные и апробированные элементы ускорительной техники, показан на рис. 4. В качестве основных деталей двух магнитных зеркал предлагается использовать детали ярма магнита установки АРЕС, которые, как это показано на рис. 6, будут безо всякой дополнительной обработки встроены в ярмо магнитных зеркал с небольшим добавлением вставок и полюсных накладок.

Это позволит сэкономить около 100 т стали и значительно удешевить изготовление самых трудоемких элементов ускорителя. Имеющиеся в наличии магниты типа ОМ-2 после замены полюсных насадок могут оказаться подходящими в качестве четырех малых отклоняющих магнитов. Для изготовления магнитных квадрупольных линз могут быть использованы хорошо апробированные линзы типа МЛ-3 с заменой сплошного ярма на набор изолированных пластин из листовой стали толщиной 1–2 мм. В основу конструкции инжектора протонов на энергию 2,1 МэВ может быть положена разработка НИЭФА по тандем-ускорителю протонов и тяжелых ионов УП-2 [8], один экземпляр которого был изготовлен и поставлен в Институт ядерной физики Республики Казахстан еще в 90-е гг.

Особенность этого ускорителя, изображенного на рис. 7, состоит в том, что в нем сначала ускоряются ионы H^- до энергии 1 МэВ, которые затем

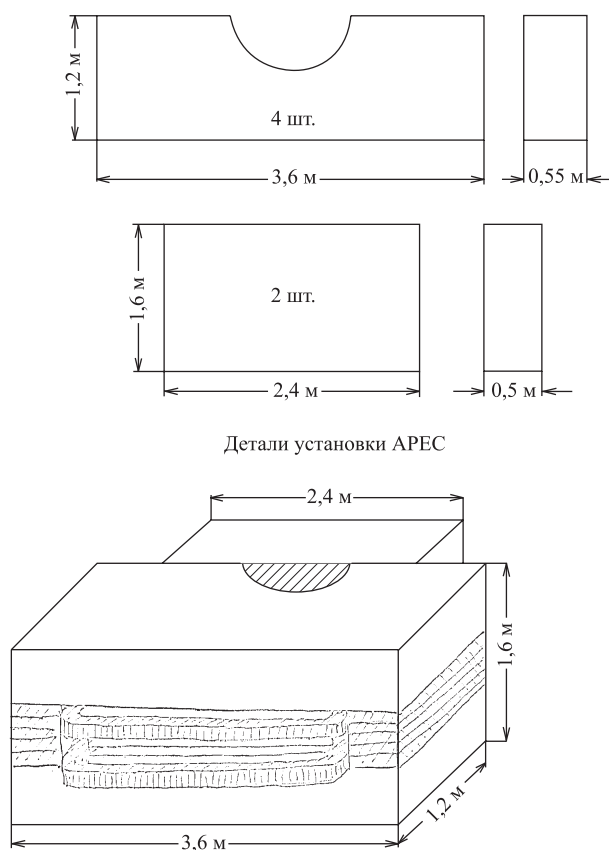


Рис. 6. Компоновка магнитных зеркал из деталей ярма магнита установки АРЕС

перезаряжаются в H^+ и во второй половине ускорителя увеличивают энергию до 2 МэВ. При этом оба конца ускорителя оказываются под потенциалом земли, что представляет определенные преимущества для управления импульсным источником H^- при дозировании заданного количества ионов в каждом цикле ускорения. Такого типа инжектор может быть изготовлен в Лаборатории ядерных проблем, если в нем для каскадного умножителя напряжения использовать детали от промышленного рентгеновского аппарата РАП-160, в котором имеется компактный высоковольтный трансформатор на пиковое напряжение 160 кВ, помещенный в трубу диаметром около 300 мм, наполненную элегазом до давления 3,5 атм, или заменить постоянный источник напряжения на импульсный трансформатор с ферритовым сердечником и

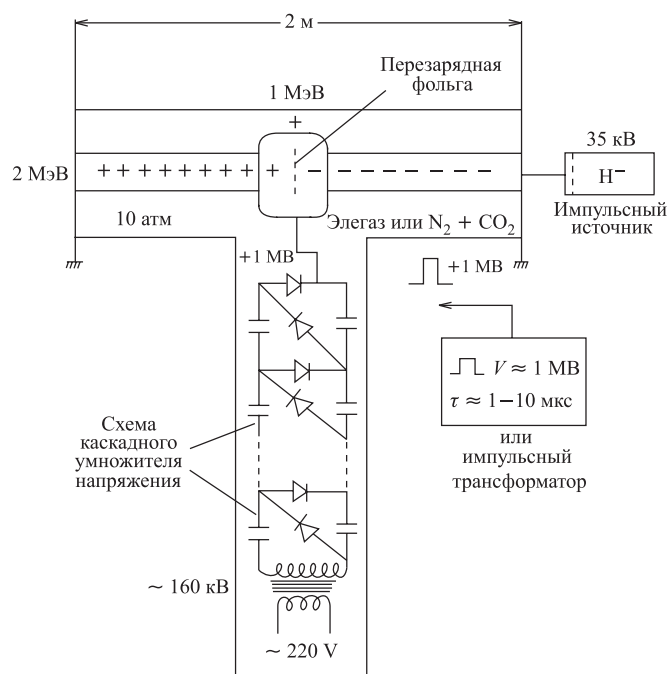


Рис. 7. Схема тандем-ускорителя на энергию протонов 2 МэВ

длительностью импульса несколько 1 мкс, что увеличит электрическую прочность конструкции инжектора.

В качестве ускоряющей системы могут быть использованы либо хорошо известные дрейфовые трубки, соединенные с колебательным контуром высокочастотного генератора, в котором индуктивность с ферритовым сердечником в широких пределах изменяет свою величину путем подмагничивания по определенному закону этого ферритового сердечника, либо ферритовые резонаторы с подмагничиванием, разработанные и опробованные в Институте ядерной физики им. Г. И. Будкера в Новосибирске [9].

Конструкция одновиткового ударного магнита с ферритовыми разрезными кольцами, обеспечивающая получение импульса магнитного поля напряженностью 0,1–0,2 Тл и с передним фронтом около 100 нс, может быть взята в упрощенном виде из разработанного в Протвино устройства для быстрого вывода пучка протонов с энергией 70 ГэВ [9].

В целом предложенный ускоритель может быть изготовлен силами Лаборатории ядерных проблем в порядке текущей деятельности, без привлечения сторонних организаций, за 5–6 лет, установлен и испытан в четвертой при-

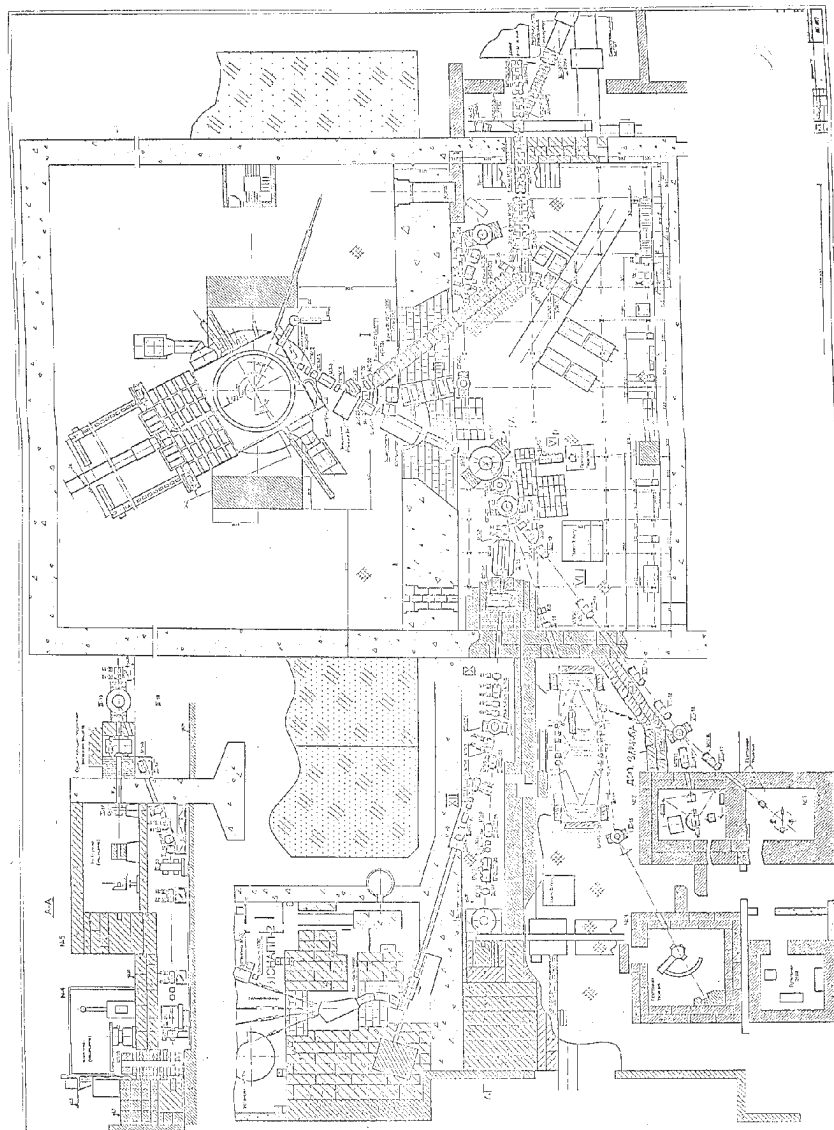


Рис. 8. Вариант расположения нового ускорителя в здании медико-технического комплекса ЛЯП ОИЯИ

стройке первого корпуса ЛЯП, как это показано на рис. 8, без остановки фазотрона и перерыва в облучении больных на медицинских пучках фазотрона ЛЯП ОИЯИ.

В Лаборатории ядерных проблем имеется положительный опыт реализации крупных проектов без существенных затрат и в порядке текущей деятельности производственно-технических подразделений лаборатории. Так, автором этой работы еще в 1990 г. было выдвинуто два предложения по созданию интенсивного пучка сепарированных «поверхностных» мюонов и по модернизации мезонных каналов фазотрона [11, 12]. При этом техническое задание в КО ЛЯП на эти проекты было составлено с учетом максимального использования готовых магнитных элементов и крупногабаритных деталей, оставшихся после реконструкции синхроциклотрона в фазотрон с пространственной вариацией магнитного поля, что позволило снизить затраты на реализацию этих проектов до нескольких десятков тысяч долларов [13, 14].

Такой же подход к реализации предложенного ускорителя может привести к снижению затрат на его изготовление до уровня 0,5–0,7 млн долл. США в основном на оплату стандартного промышленного оборудования и приборов.

В отдаленной перспективе магнитные зеркала можно будет изготовить в сверхпроводящем варианте, увеличив магнитную индукцию с 2 до 4 Тл и тем самым снизив вес зеркал примерно в три раза, или при сохранении габаритов сделать ускоритель пригодным для ускорения ядер углерода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен ускоритель протонов нового типа (фазотрон с разделенным магнитом или рециркуляционный фазотрон), в котором магнитное поле в отклоняющих магнитах является постоянным, а частота ускоряющего электрического поля и градиенты магнитного поля в фокусирующих линзах изменяются во время цикла ускорения по заданным программам.

Проведен анализ траекторной сопряженности, а также фазовой, пространственной и резонансной устойчивости заряженных частиц в новом ускорителе, позволяющий сделать вывод о его принципиальной осуществимости.

Такие особенности нового ускорителя, как быстроцикличность (50–100 Гц) и возможность изменять энергию и количество частиц в каждом цикле ускорения, наиболее полно соответствуют клиническим требованиям к протонным пучкам, особенно при использовании перспективных методов активного формирования дозных полей. Предложен технический вариант реализации нового ускорителя в здании медико-технического комплекса ЛЯП ОИЯИ, предусматривающий использование имеющихся в наличии крупногабаритных деталей ярма и медной трубки для основных магнитов нового

ускорителя, разработок конструкторского отдела ЛЯП ОИЯИ по отклоняющим магнитам и линзам, а также стандартных изделий промышленного производства РФ. Это позволит значительно уменьшить суммарные затраты на его изготовление, монтаж и наладку и осуществить весь проект в рамках текущей деятельности Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ без обращения в сторонние организации по поводу каких-либо дополнительных разработок и изготовления специального оборудования.

Оснащение медико-технического комплекса ЛЯП ОИЯИ предложенным ускорителем откроет широкую перспективу для дальнейшего развития протонной терапии в ЛЯП ОИЯИ на основе качественно лучших пучков и с использованием наиболее передовых методик облучения пациентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдина Э. // Новости ОИЯИ. 2005. № 1. С. 23.
2. Мицын Г. В. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2003-105. Дубна, 2003.
3. Аленицкий Ю. Г. и др. Сообщение ОИЯИ Р9-2004-32. Дубна, 2004.
4. Alenitsky Yu. G. et al. // Proc. of XIX RUPAC (Russian Particle Accelerator Conference), Dubna, October 4–8, 2004. P. 162.
5. Хорошков В. С. // Медицинская физика. 2005. № 4. С. 6.
6. Онищенко Л. М. Препринт ОИЯИ Р9-93-272. Дубна, 1993.
7. Лебедев А. Н., Шальнов А. В. Основы физики и техники ускорителей. М.: Энергоиздат, 1991. С. 67–68.
8. Голубев В. П. и др. // Тр. XII Всесоюзного совещ. по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1992. Т. 1. С. 132.
9. Авербух И. И. // ПТЭ. 1978. № 4. С. 19.
Абдульманов В. Г. и др. // ПТЭ. 1976. № 3. С. 24.
Arbizov V. S. et al. // Proc. of XIX RUPAC, Dubna, October 4–8, 2004. P. 95.
10. Асеев А. А. и др. // Тр. III Всесоюзного совещ. по ускорителям заряженных частиц, Москва, 1972. М.: Наука, 1973. Т. 2. С. 160.
11. Савченко О. В. // Сб. совещ. по программе экспериментов на фазотроне ОИЯИ. Д1-90-480. Дубна, 1990. С. 14.
Савченко О. В. Депонированная публикация Б1-18-90-51. Дубна, 1990.

12. *Савченко О. В.* // Сб. совещ. по программе экспериментов на фазотроне ОИЯИ. Д1-90-480. Дубна, 1990. С. 21.
Савченко О. В. Депонированная публикация Б1-9-89-177. Дубна, 1989.
13. *Абазов В. М. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-93-81. Дубна, 1993.
14. *Андреев Е. М. и др.* Сообщение ОИЯИ Р9-2005-9. Дубна, 2005.

Получено 19 апреля 2007 г.

Редактор *Е. В. Сабеева*

Подписано в печать 18.09.2007.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,31. Уч.-изд. л. 1,67. Тираж 270 экз. Заказ № 55891.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/