

ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВЕ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ ДО 100 МэВ

*Н.И. Айзацкий, В.И. Белоглазов, В.П. Божко, В.Н. Борискин, В.Н. Верещак,
А.Н. Водин, А.Н. Довбня, В.Ф. Жигло, В.С. Коваленко, Е.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнир,
В.В. Митроченко, А.Н. Опанасенко, С.Н. Олейник, С.А. Пережогин, Г.Д. Пугачев,
О.А. Репихов, Л.В. Репринцев, Д.Л. Степин, В.И. Татанов, Г.Э. Туллер, И.В. Ходак*
*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*
E-mail: kushnir@kipt.kharkov.ua

Описана комплексная экспериментальная установка ННЦ ХФТИ, предназначенная для проведения широкого спектра ядерно-физических исследований, в частности, для изучения фотоядерных реакций в диапазоне энергий тормозных гамма-квантов 30...100 МэВ. Основным элементом установки является двухсекционный линейный ускоритель электронов 10 см-диапазона. Описаны основные системы ускорителя, приведен анализ результатов исследования пространственных и энергетических характеристик пучка. Изложены методики обработки результатов измерений и соответствующее экспериментальное оборудование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Сведения о константах фотоядерных реакций (выходы, сечение реакций, времена жизни уровней и др.) необходимы для решения целого ряда прикладных задач радиационного материаловедения, физики ускорителей, нейтронной физики, активационного анализа, получения и производства радионуклидов. Фотоядерные реакции детально исследованы в диапазоне энергий гигантского дипольного резонанса (ГДР) и энергий, превышающих порог образования пионов. По ряду причин область энергий выше ГДР (от 30 до 100 МэВ) исследована недостаточно полно. В последние годы большое внимание уделяется развитию теоретических и модельных подходов в описании фотоядерных реакций в этой области энергий – получила значительное развитие квазиэлектронная модель, были развиты целый ряд модельных подходов к описанию течения предравновесных процессов и множественного вылета частиц. В то же время практически полное отсутствие экспериментальных данных о взаимодействии гамма-квантов с ядрами в области энергий 30...100 МэВ ограничивает как проверку модельных подходов, так и общее понимание процессов взаимодействия гамма-квантов с ядрами в этом диапазоне энергий. В связи с этим в ННЦ ХФТИ в течение последних лет создан специализированный экспериментальный комплекс, содержащий линейный ускоритель электронов с энергией 30...100 МэВ, пневмо-транспортную систему и аппаратуру для исследования фотоядерных реакций.

2. ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ

Основным элементом комплекса является линейный ускоритель электронов, созданный в результате реконструкции существующего в ННЦ ХФТИ ускорителя с предельной энергией 40 МэВ. Упрощенная структура ускорителя после реконструкции показана на Рис.1. В качестве источника электронов используется диодная электронная пушка с напряжением 25 кВ и током 250 мА. Группирующая система состоит из цепочки связанных резонаторов, в

которой благодаря специальному выбору размеров ячеек реализуется экспоненциально нарастающее продольное электрическое поле [1, 2]. Как показали предварительные исследования динамики электронов в такой системе, она не только обеспечивает эффективную группировку, но и позволяет формировать пучок с малым эмиттансом. Основное ускорение электронов осуществляется в двух ускоряющих секциях типа «Харьков-85» [3] с квазипостоянной структурой, которые отличаются значительным темпом ускорения (20 МэВ/м при СВЧ-мощности 26 МВт) и малой групповой скоростью (среднее значение 0,016 с). СВЧ-питание ускорителя осуществляется от двух клистронных усилителей с выходной мощностью до 18 МВт. Для обеспечения нормальной работы группирователя к его резонансной системе подводится мощность 750 кВт. Для поддержки постоянной температуры секций и инжектора служит система термостатирования. Фокусировка пучка на выходе ускорителя осуществляется с помощью дублета квадрупольных линз. Положение пучка в пространстве регулируется с помощью корректоров, установленных на секциях (катушки Гельмгольца), а также на выходе инжектора и второй секции. Для измерения тока пучка и положения его центра тяжести на выходе каждой секции и непосредственно перед выпускной фольгой установлены измерители индукционного типа [4]. Энергия и энергетический разброс частиц измеряется с помощью магнитного анализатора, включающего дипольный магнит с углом поворота 25° и цилиндр Фарадея. Разрешающая способность анализатора по энергии составляет 0,2%. За устройством для выпуска пучка в атмосферу установлен монитор [5], позволяющий на качественном уровне проводить контроль положения центра тяжести и поперечных размеров пучка.

Сигналы измерителей амплитуды тока и положения центра тяжести пучка, цилиндров Фарадея, детекторных датчиков СВЧ-поля и другая необходимая информация, в том числе поступающая от

аппаратуры экспериментаторов, подаются на компьютер оператора ускорителя. С помощью специальной программы проводится обработка данных,

что позволяет проводить настройку ускорителя и измерять все параметры пучка.

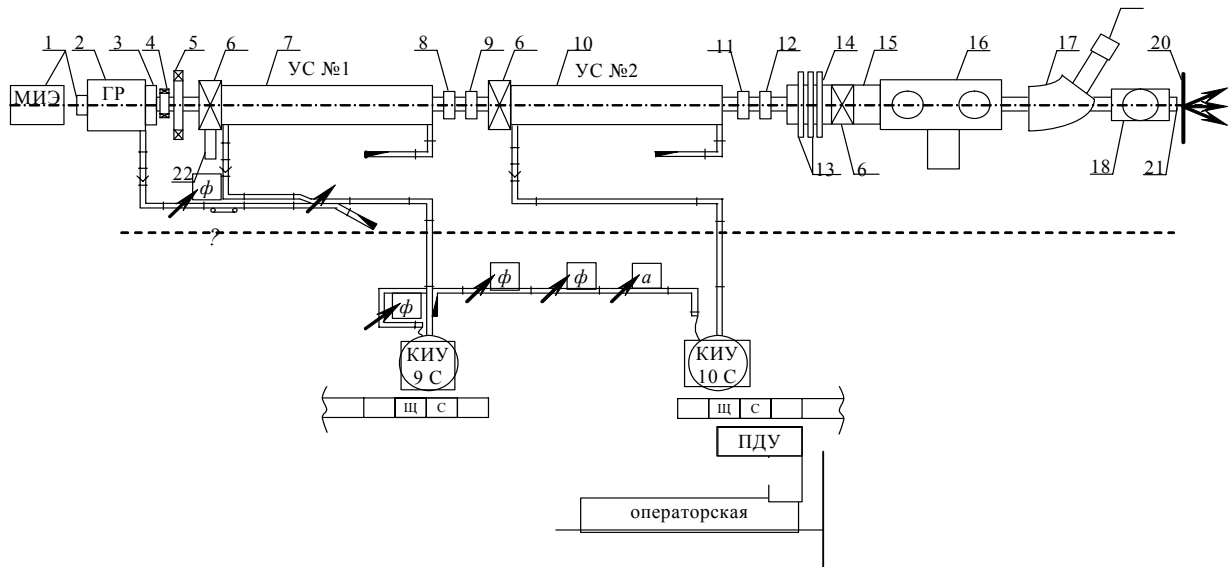


Рис.1. Структура ускорителя:

1 – электронная пушка с модулятором; 2 – инжектор; 3, 8 – измерители тока пучка; 4, 11 – корректоры положения пучка; 5 – линза; 6 – вакуумный клапан; 7, 10 – ускоряющие секции; 9, 12, 21 – датчики положения пучка; 14 – триплет квадрупольных линз; 16 – блок целевых коллиматоров с цилиндром Фарадея; 17 – магнитный анализатор с цилиндром Фарадея; 18 – устройство вывода пучка; ПДУ – пульт дистанционного управления; φ – фазовращатели; а – аттенюатор

Оптимизация режимов работы ускорителя для обеспечения экспериментов потребовала выполнения значительного объема вычислительных работ. Моделирование самосогласованной динамики электронов в ускорителе с учетом сил пространственного заряда и переходных процессов проводилось при помощи компьютерного кода, детально описанного в [6]. На начальной стадии была создана компьютерная модель ускорителя, включающая все его основные элементы (пушку, группирователь, секции, магнитные элементы). Основной задачей моделирования было не только определение параметров пучка (см. Табл. 1) и их зависимостей, но и отработка методик настройки ускорителя.

секциях составляет около 1 мкс, при длительности импульса 1.5 мкс и данной величине тока полностью компенсировать энергетический разброс выбором времени инжекции пучка в ускоряющую структуру не удастся. При использовании двух секций «Харьков-85» довольно сложной задачей является получение пучка с энергией меньше 40 МэВ при сохранении спектральных и пространственных характеристик. В то же время для проведения ядерно-физических исследований желательно расширить энергетический диапазон до 25...35 МэВ. Очевидным способом уменьшения энергии на выходе ускорителя является уменьшение СВЧ-мощности. Так, в нашем случае можно получить на выходе ускорителя частицы с энергией 33 МэВ, вводя в первую секцию мощность 9,4 МВт, при отсутствии СВЧ-питания второй секции. В этом случае энергетический разброс частиц составляет 9%, а поперечные размеры пучка – 0,3 см. Дальнейшее уменьшение энергии электронов на выходе двухсекционного ускорителя достигается путем инжекции сгустков во вторую секцию в «тормозящей» фазе. При этом, например, если мощность питания первой секции равняется 9,4 МВт, а второй – 2 МВт, то энергия электронов на выходе ускорителя составляет 15 МэВ при фазовой длине сгустка 20° и энергетическом разбросе 12%. Таким образом, существует принципиальная возможность получения электронного пучка с энергией частиц в диапазоне 15...100 МэВ, что позволяет существенно расширить возможности установки.

Таблица 1.

Результаты моделирования: параметры пучка на выходе из первой и второй секций

Секция	I	II
P, МВт	16	16
I (мА)	63	62,7
W_{cp} , МэВ	44,9	89,3
W_{max} , МэВ	48,0	94,3
$\Delta W/W$ для 70%, (%)	8,2	5,4
$\Delta W/W$ FWHM, (%)	2,5	0,5
$\Delta\phi$ 70% (град.)	17,7	17,1
$\sigma_{x,y}$, мм	0,7	0,7
ϵ_{rms} п. x, y, мм·мрад	6	6

Из результатов моделирования следует, что при импульсных токах пучка в десятки миллиампер ширина энергетического спектра в основном определяется изменением энергии частиц из-за токовой подгрузки. Поскольку время установления колебаний в

Экспериментальное исследование характеристик пучка на выходе ускорителя в диапазоне энергии электронов 30...98 МэВ проводилось при различных

уровнях вводимой в ускоряющие секции мощности. В ходе экспериментов была отработана методика, позволяющая оперативно настраивать энергию частиц в диапазоне 35...100 МэВ путем изменения мощности и фазы СВЧ-питания второй секции. При этом мощность и фазовые соотношения питания первой секции и инжектора оставались неизменными, что позволяло поддерживать одинаковые условия для формирования сгустков. При проведении исследования спектральных характеристик мы использовали методику обработки данных, которая позволяла получать информацию (см. Рис.2) о временной зависимости спектрального распределения частиц от времени в течение импульса тока.

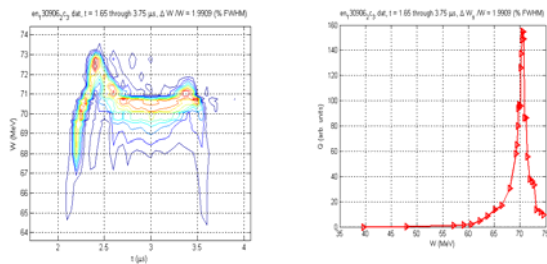


Рис.2. Зависимость энергии электронов на входе ускорителя от времени в течение импульса тока (слева) и интегральный спектр (справа). Импульсный ток 50 мА, размер пучка на мишени 5 мм

Анализ результатов измерений показал, что основной вклад в энергетический разброс, как следовало из результатов моделирования, дают нестационарные процессы, которые связаны с нагрузкой секций ускоряемым пучком. Формирование необходимого спектрального распределения достигалось изменением времени инжекции пучка относительно начала импульса высокочастотного питания секций. Кроме негативного влияния на спектр пучка эффект токовой подгрузки дает возможность управлять формой энергетического спектра. Так, в частности, для проведения экспериментов по определению порога фотоядерных реакций был сформирован спектр с резкой границей со стороны высоких энергий.

Одним из путей улучшения спектра частиц является уменьшение импульсного тока пучка. Очевидно, что для сохранения среднего тока при этом необходимо увеличить либо частоту следования, либо длительность импульсов. Детальная проработка другого метода, который основан на внутриимпульсном изменении мощности (или фазы) в системе СВЧ-питания, будет проведена в ходе последующей эксплуатации ускорителя.

В ходе экспериментов была проверена принципиальная возможность уменьшения энергии на выходе путем подачи во вторую секцию малого (1...2 МВт) уровня СВЧ-мощности и торможения электронов. Результаты измерений (Рис.3) подтвердили правильность этого метода.

Измерения эмиттанса пучка проводились с использованием хорошо известного метода квадруполей. Результаты измерений показали, что величина нормализованного эмиттанса составляет 65 мм·мрад и 72 мм·мрад для первой секции и 72 мм·мрад при работе двух секций.

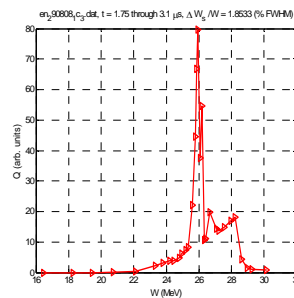


Рис.3. Спектры пучка при торможении электронов во второй секции ускорителя $P_{2c} \approx 1$ МВт

Видно, что увеличение эмиттанса во второй секции незначительно и, следовательно, формирование пространственных характеристик определяется инжектором и первой секцией. Измеренные значения эмиттанса существенно ниже в сравнении с существующими ускорителями электронов этого класса, но в то же время они значительно превышают значения, полученные при моделировании. Наиболее вероятной причиной этого несоответствия являются асимметрия поля в системе инжектора и неудовлетворительная юстировка элементов начальной части ускорителя. Проведение экспериментов по исследованию фотоядерных реакций в диапазоне энергии электронов 30...100 МэВ потребовало оптимизации режимов ускорителя и их согласования с требованиями экспериментаторов. Особенное внимание было уделено достижению максимально возможной стабильности энергетического спектра электронов на протяжении сеанса облучения образцов. Так, измерение этого параметра при проведении 38 сеансов облучения длительностью 0,3 часа показало, что среднеквадратичная нестабильность энергии не превышает 1,2%. Анализ основных дестабилизирующих факторов показал, что основной причиной нестабильности энергии является нестабильность уровня СВЧ-мощности на выходе клистронных усилителей, которая вызывается нестабильностью системы энергоснабжения ускорителя.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВЫХОДОВ И СЕЧЕНИЙ ФОТОЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

Полученные параметры пучка на выходе линейного ускорителя (см. Табл. 2) позволяют проводить экспериментальные исследования фотоядерных реакций в диапазоне энергий гамма-квантов 30...100 МэВ.

Таблица 2.

Основные параметры пучка на выходе ускорителя ЛУ-40

W, МэВ	30...100
$\Delta W/W$ (FWHM), %	< 2
$I_{\text{имп}}$, мА (W=40 МэВ)	70
$I_{\text{имп}}$, мА (W=100 МэВ)	40
$I_{\text{ср}}$, мкА (W=100 МэВ)	3*
τ , мкс	1.5...1.6
ϵ_n , мм·мрад	70
F, Гц	50

*Ток ограничен существующей радиационной защитой.

Для проведения этих исследований были разработаны и реализованы различные методики, в том числе – для изучения наведенной γ -активности ядер с периодом полураспада $10^{-3} \dots 1$ с. При этом регистрация γ -активности образцов проводилась в промежутке между импульсами тока ускорителя. Суть метода состоит в проведении сеанса циклических измерений во время работы ускорителя с блокированием сцинтилляционного детектора и анализатора спектра в течение импульсов тока. Кроме того, интервал времени между импульсами также разбивался на несколько подинтервалов, в течение которых регистрация γ -спектров проводилась в различных ячейках памяти анализатора. Методика базируется на использовании анализатора спектра АМА-02Ф1 и специально разработанных электронных блоков в стандарте "ВЕКТОР".

Для реализации метода измерения выходов γ -активности ядер с периодом полураспада $T_{1/2} > 1$ мин и сечений фотоядерных реакций (схема приведена на Рис.4) была разработана пневмо-транспортная система, позволяющая перемещать образец из измерительной комнаты в бункер ЛУ-40 и обратно за время, не превышающее 10 с. Эта система состоит из мишенного устройства, в котором располагается исследуемая мишень в Al-капсуле, гибких шлангов и приемного устройства капсулы, расположенной в измерительной комнате. Мишенное устройство позволяет позиционировать капсулу на пучке γ -квантов с точностью ± 1 мм и снабжено системой контроля его смещения в трех координатах (x,y,z). Система оснащена датчиками перемещения капсулы в бункере ускорителя ЛУ-40.

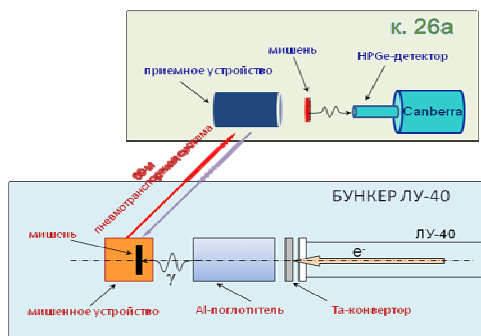


Рис.4. Схема измерения выхода и сечений фотоядерных реакций ($T_{1/2} > 1$ мин)

Сечения фотоядерных реакций определяются по наведенной активности изотопной мишени, которая облучается потоком тормозных γ -квантов, получаемых при бомбардировке Та-конвертора толщиной 1 мм ускоренными электронами. Важнейшим элементом методики по определению сечений является способ определения числа γ -квантов тормозного излучения, упавших на мишень. В данном подходе это число определяется расчетным путем с помощью международного кода GEANT. С помощью этого кода моделируются условия формирования пучка γ -квантов с Та-конвертора после прохождения Al-поглотителя (для энергии 100 МэВ толщина поглотителя равна 19 см). Интенсивность γ -квантов определяется по интенсивности пучка электронов, которая измеряется с помощью измерителя тока и

цилиндра Фарадея. В расчетах учитывается расходимость электронного пучка и распределение плотности частиц на конверторе, которая определяется путем фотометрирования стеклянной пластинки, дистанционно устанавливаемой перед конвертором.

Контроль пространственного распределения γ -квантов на мишени (Рис.5) осуществляется путем измерения наведенной активности элементов медной мозаики, располагаемой перед мишенью.

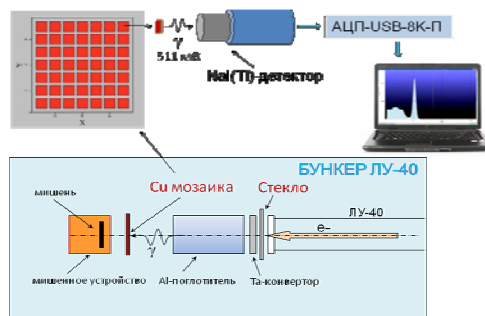


Рис.5. Методика определения пространственного распределения γ -квантов

Мозаика представляет собой набор из 7×7 квадратных медных элементов размерами 3×3 мм. Активность γ -линии 511 кэВ каждого элемента измеряется с помощью NaI(Tl)-детектора и амплитудного анализатора АЦП-USB-8К-П, управляемого персональным компьютером. По измеренным активностям, с учетом временной зависимости изменения интенсивности, строится пространственное распределение γ -квантов перед мишенью.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ННЦ ХФТИ создана экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования фотоядерных реакций в диапазоне энергий γ -квантов от 30 до 100 МэВ. Уже первые эксперименты показали перспективность выбранного направления работы. Так, например, впервые экспериментально получены значения изомерных отношений ядер ^{104}Ag и ^{110}In из реакций $^{107}\text{Ag}(\gamma, 3n)^{104}\text{Ag}$ и $^{113}\text{In}(\gamma, 3n)^{110m.g}\text{In}$. Важнейшей задачей дальнейшей работы является улучшение спектральных характеристик пучка на выходе ускорителя и проведение экспериментов по определению сечений фотоядерных реакций с множественным выходом частиц.

Работа поддерживается грантом НАН Украины X-9-242.

ЛИТЕРАТУРА

1. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, V.A. Kushnir, et al. Bunching systems of electrons on base evanescent waves // *Proc. of PAC'03, Portland*, 2003, p.1605-1607.
2. M.I. Ayzatsky, E.Z. Biller, K.Yu. Kramarenko, et al. The investigations of the beam characteristics in the electron injector based on resonance system with evanescent oscillation // *Proc. of RuPAC XIX*. 2004, p.444-446.
3. E.Z. Biller, A.N. Dovbnia, V.A. Kushnir, et al. Beam current enhancement in Kharkov electron linac // *Particle Accelerators*. 1990, v.27, №1-4, p.119-124.

4. В.Н. Борискин, Л.В. Репринцев, А.Н. Савченко и др. Измеритель положения и тока пучка ускорителя ЛУЭ-40 // *Тезисы докладов XX международного семинара по ускорителям заряженных частиц*. 2007, Алушта, с.80.
5. В.Н. Борискин, В.И. Татанов. Контроль положения пучка электронов в атмосфере // *Problems of Atomic Science and Technology. Series "Nuclear Physics Investigations"* (49). 2008, №3, p.75-77.
6. V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko. Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code // *Nuclear Instruments & Methods*. 2006, A558, p.235-239.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

ELECTRON 100 MeV LINAC BASED FACILITY TO NUCLEAR-PHYSICAL EXPERIMENTAL INVESTIGATION

N.I. Ayzatsky, V.I. Beloglazov, V.P. Bozhko, V.N. Boriskin, V.N. Vereschaka, A.N. Vodin, A.N. Dovbnya, V.F. Zhiglo, V.S. Kovalenko, E.Yu. Kramarenko, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, A.N. Opanasenko, S.N. Oleynik, S.A. Perezhogin, G.D. Pugachev, O.A. Repikhov, L.V. Reprintsev, D.L. Stepin, V.I. Tatanov, G.E. Tuller, I.V. Khodak

The experimental facility intended to carry out the wide spectrum of nuclear-physical researches has been created at NSC KIPT. The facility is based on two-sectional S-band electron linac with output average beam current of 3...6 μ A. Energy of particles at the linac output can be changed over the range of 30...100 MeV. This paper describes the main systems of the linac as well as the results of spatial and energy beam characteristic study. The electron beam measurements are presented in comparison with beam dynamic simulations. Optimization of linac operations mode to carry out experiments on the study of photonuclear reaction with plural emergence of particles under gamma-ray photon energies of 30...100 MeV are presented. The paper describes the methods of experimental data processing as well as experimental equipment.

ЯДЕРНО-ФІЗИЧНИЙ КОМПЛЕКС НА ОСНОВІ ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ З ЕНЕРГІЄЮ ДО 100 MeV

М.І. Айзацький, В.І. Белоглазов, В.П. Божко, В.М. Борискін, В.М. Верещака, А.М. Водін, А.М. Довбня, В.Ф. Жигло, В.С. Коваленко, К.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, А.М. Опанасенко, С.М. Олійник, С.А. Пережогін, Г.Д. Пугачов, О.А. Репіхов, Л.В. Репрінцев, Д.Л. Степін, В.І. Татанов, Г.Э. Туллер, І.В. Ходак

У ННЦ ХФТІ створено комплексну експериментальну установку, яка призначена для проведення широкого спектру ядерно-фізичних досліджень. Основним елементом установки є двохсекційний лінійний прискорювач електронів 10см-діапазону. При середньому струмі пучка 3...6 мкА енергія частинок на виході прискорювача може регулюватися у межах 30...100 MeV. Описано основні системи прискорювача, приведено аналіз результатів дослідження просторових і енергетичних характеристик пучка. Проведено порівняння зміряних і отриманих у результаті моделювання значень основних параметрів пучка. Основна увага приділяється оптимізації режимів роботи прискорювача для експериментів по вивченню фотоядерних реакцій з множинним вильотом частинок у діапазоні енергій гальмівних гамма-квантів 30...100 MeV. Описано методи обробки результатів вимірювань і експериментальне устаткування.