



ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УСКОРЕНИЯ ПОЗИТРОНОВ В ЛУЭ НА БЕГУЩЕЙ ВОЛНЕ

Л. З. Джилавян¹, А. И. Карев²

¹ *Институт ядерных исследований Российской академии наук*

Москва, Россия

² *Физический институт имени П. Н. Лебедева Российской академии наук*

Москва, Россия

- **Введение**
- **Параметры: секций ЛУЭ; e^- -пучка; мишени-конвертера.
Коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$**
- **Использованная модель расчетов**
- **Результаты расчетов**
- **Заключение.**

- Пучки ультрарелятивистских позитронов (e^+) с малыми поперечными эмиттансами и энергетическими разбросами – важный и актуальный инструмент экспериментальной физики, нашедший применение в ряде направлений исследований:
- эксперименты на встречных электрон-позитронных пучках (e^-e^+) (e.g., нижеуказанные публикации из Новосибирска и многочисленные ссылки в них);
- эксперименты по рассеянию e^- и e^+ при одинаковых переданных импульсах для выявления роли двухфотонного обмена [*Rachek I.A., et al. EMIN-2012. INR RAS, M. 2013. P. 108*];
- эксперименты по электродезинтеграции ядер с e^- и e^+ , использующие различия спектров виртуальных фотонов для расширения возможностей мультипольного анализа (e.g., [*Dzhilavyan L.Z. et al. Phys. Particl. Nucl., 48, No1(2017)139*]);
- эксперименты по изучению фотоядерных реакций (e.g., [*Dzhilavyan L.Z., Kucher N. P. Sov. J. Nucl. Phys. 30(1979)151; Dietrich S.S., Berman B.L. Atomic Data Nuclear Data Tables. 38(1988)199*]) и фоторождения частиц (e.g., [*Argan P., et al. NIM 228(1984)20; Ballam J., et. al. // NIM 73(1969)53*]) под действием реальных квазимонохроматических фотонов от аннигиляции e^+ на лету;
- эксперименты по изучению взаимодействий e^- и e^+ в кристаллах (e.g., [*Miroshnichenko I.I., et al. JETP Letters. 29(1979)722; Alguard M.J., et al. Phys. Rev. Lett. 42(1979)1148*]), интересные и для понимания физики вовлеченных процессов (испускание тормозного излучения; каналирование; поворот пучков, захваченных в режим каналирования в изогнутых кристаллах), и для изучения свойств кристаллов.
- Для подтверждения вышеупомянутой актуальности укажем, например, на работающий в Новосибирске комплекс установок со встречными (e^-e^+)-пучками ВЭПП-4 – ВЭПП-2000 [<http://www.inp.nsk.su/nauka/issledovatel'skaya-infrastruktura/nauchnye-ustanovki/kompleks-vepp-4-vepp-2000/>] и на разработку там же “mega-science”-проекта «Ускорительный комплекс со встречными (e^-e^+)-пучками (Супер - чарм - тау фабрика)» [<https://ctd.inp.nsk.su/c-tau/>]

- Основной способ получения первичных e^+ для рассматриваемой задачи – конверсия $e^- \rightarrow e^+$ при бомбардировке пучком e^- толстых мишеней-конвертеров из материалов с высокими Z и ρ . При этом у e^+ -пучков из конвертеров широкие разбросы по T^+ и θ^+ .
- В одном варианте методики магнитная система выделяет из полного e^+ -пучка часть с малым эмиттансом и с требуемыми энергиями без ускорения e^+ из конвертеров (e.g., [Miller J., et al. J. Physique Rad. 21(1960)755; Dzhilavyan L.Z., Kucher N. P. Sov. J. Nucl. Phys. 30(1979)151]).
- В другом варианте исходные e^+ из конвертеров до такого выделения ускоряются (e.g., [Jupiter C. P., et al. Phys. Rev. 121(1961)866; Dzhilavyan L.Z. // Trudy VI Vsesouznogo soveshchaniya po uskoritelyam zaryazhennykh chastitz. JINR. Dubna. 1979. V. 2. P. 182]), и здесь особенно привлекательны многосекционные резонансные линейные ускорители e^- (ЛУЭ), включая, ЛУЭ на бегущей СВЧ-волне, в частности, рассматриваемый здесь ЛУЭ-100 ИЯИ РАН.
- Для реализации варианта получения e^+ в многосекционных ЛУЭ с использованием их ускорения важно, используя характерные черты e^+ -генерации в оптимальных конвертерных мишенях, изучить особенности динамики движения e^+ в секциях ЛУЭ. Эта задача была ранее рассмотрена нами в [Dzhilavyan L.Z., Karev A. I. // Trudy VII Vsesouznogo soveshchaniya po uskoritelyam zaryazhennykh chastitz. JINR. Dubna. 1981. V. 1. P. 209]. Однако недавнее исследование [Belyshev S.S., Dzhilavyan L.Z., Polonski A.L. Phys. Atom. Nucl. (2020)] величин K – дифференциальных коэффициентов конверсии $e^- \rightarrow e^+$ выявило существенные их отличия от использованных нами ранее, что привело к необходимости вернуться к рассмотрению задачи, которое и проводится в настоящей работе на примере установки на ЛУЭ-100.

Параметры: секций ЛУЭ; e^- -пучка; мишени-конвертера. Коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$

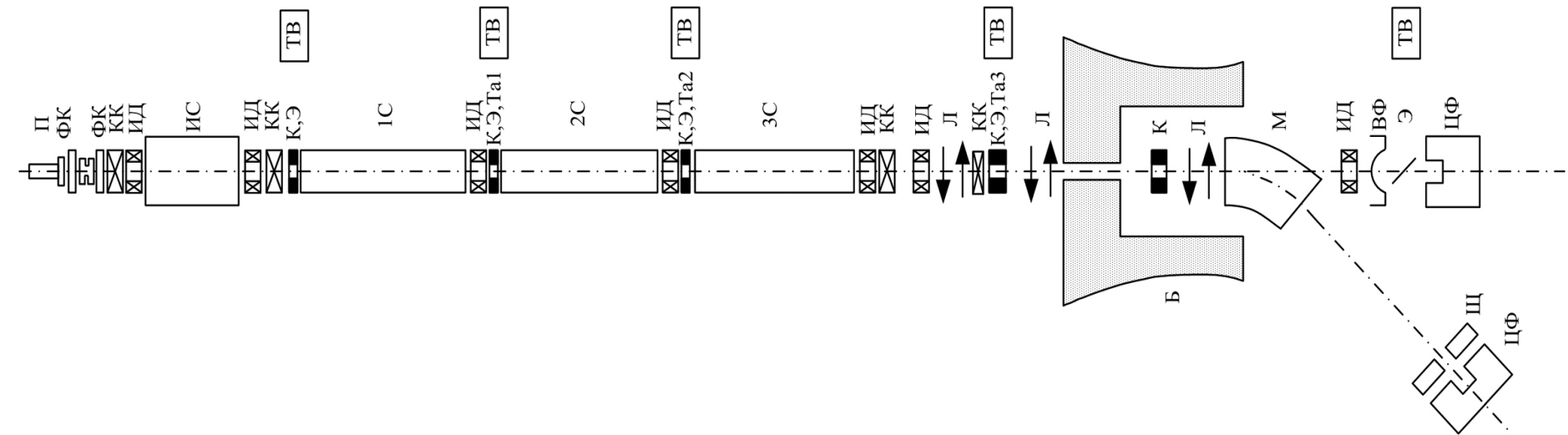


Схема расположения оборудования на ЛУЭ-100 ИЯИ РАН: П– e^- -пушка; ФК– фокусирующие катушки; КК– корректирующие катушки; ИД– магнитно-индукционные датчики пучка; К– коллиматоры; Э– люминесцентные экраны; ТВ– телевизионные камеры; [ИС и (1÷3)С]– [инжекторная и (1÷3) основные] ускоряющие секции ЛУЭ; Та(1÷3) – танталовая конвертерная мишень; Л– дублеты квадрупольных магнитных линз; М– дипольный магнит; Б– стены из бетонных блоков; ВФ– выходная фольга; Щ– анализирующая щель; ЦФ– цилиндры Фарадея

Рабочая СВЧ-частота у ЛУЭ-100 $f \cong 2797$ МГц (длина волны $\lambda = (c/f) \cong 10.7$ см, где c – скорость света в вакууме). Ускоряющие секции ЛУЭ-100 – медные открытые для укоряемых пучков $e^-(e^+)$ круглые волноводы с круглыми же диафрагмами (магнитная фокусировка на секциях (1-3)С и между секцией 3С и конвертером отсутствует).

Параметры: секций ЛУЭ; e^- -пучка; мишени-конвертера. Коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$

Ускоряющая e^+ секция ЛУЭ-100 (3С) – секция с постоянной структурой и постоянной фазовой скоростью $v_\phi = c$ для ускоряющей СВЧ-волны, имеющей электрическую составляющую вдоль продольной оси z секции. Параметры секции сведены в Таблицу, где: a – радиус отверстий диафрагм; b – внутренний радиус стенки волновода секции; l_d – толщина диафрагм; d – расстояние между центрами соседних диафрагм; μ_b – выбранный вид колебаний, то есть сдвиг фазы СВЧ-волны на элементе периодичности волновода секции ($\mu_b = 2\pi d(c/v_\phi)/\lambda = 2\pi d/\lambda$, так как $v_\phi = c$); $l_{\text{заг}}$ – длина затухания СВЧ-волны; $v_{\text{гр}}$ – групповая скорость СВЧ-волны в секции; L – длина секции; $t_{\text{зап}}$ – время заполнения секции СВЧ-волной.

Таблица. Параметры основных секций ЛУЭ-100

μ_b	d/λ	a (мм)	a/λ	b (мм)	b/λ	l_d (мм)	l_d/λ	$l_{\text{заг}}$ (м)	$v_{\text{гр}}/c$	L (м)	$t_{\text{зап}}$ (мкс)
$\pi/2$	1/4	15	0.14	43.1	0.403	4	0.037	15.7	0.04	4.5	0.375

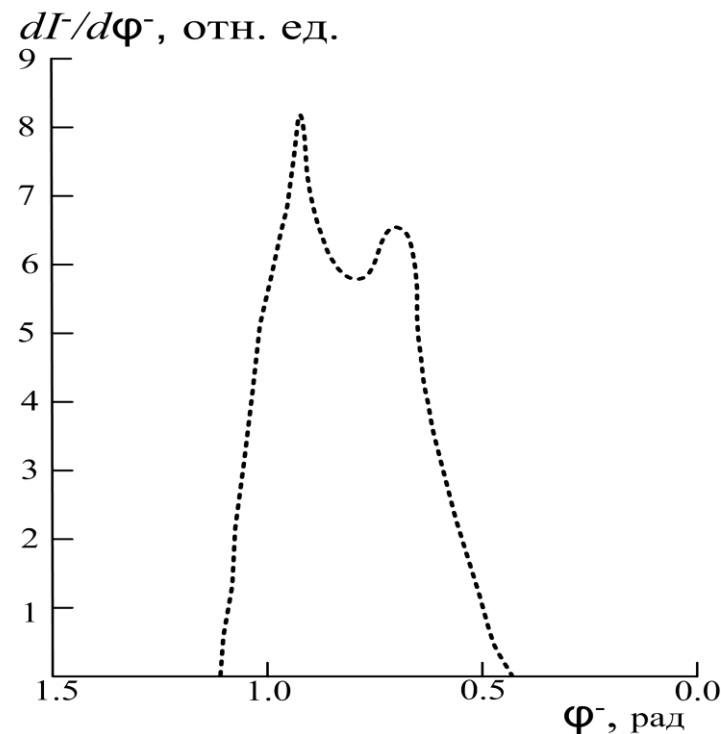
Основные секции ЛУЭ-100 (1–3)С запитываются импульсной СВЧ-мощностью до ~ 20 МВт в импульсе длительностью до (2.0÷2.2) мкс (частота повторения импульсов 50 Гц, а средняя СВЧ-мощность до ~ 2 кВт). Секции (1–3)С дают для ультрарелятивистских e^- (когда можно считать, что $v = v_\phi = c$) прирост энергии до ~ 40 МэВ, а напряженность электрической составляющей СВЧ-волны на оси z в начале секции (по пучку) E_0 до ~ 10 МэВ/м

Параметры: секций ЛУЭ; e^- -пучка; мишени-конвертера. Коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$

Вышеуказанные эксперименты на ЛУЭ-100 с e^+ -ускорением для Та-конвертера толщиной $\cong 1.3X_0$, размещенного между секциями ЛУЭ 2С и 3С на расстоянии $s \approx 20$ см до начала эффективного СВЧ-поля в секции 3С, велись при следующих параметрах падающего на конвертер e^- -пучка: кинетическая e^- -энергия в максимуме их спектра $T^- \cong 55$ МэВ при относительной полной ширине на половине высоты $\delta T^- \sim (1 \div 1.5)\%$; средний e^- -ток $I^- \cong 10$ мкА. В экспериментах изучались средние конечные e^+ -токи (после ускорения) $(I^+)_к$.

Эти измерения проводились на выходе части системы транспортировки пучка e^+ и их анализа по конечной кинетической энергии $(T^+)_к$ и ее разбросу $\Delta(T^+)_к$ для анализирующей щели, выделяющей $\Delta(T^+)_к / (T^+)_к = \pm 0.5\%$, при различных значениях на входе секции 3С E_0 – амплитуды СВЧ-волны и $\Delta\Phi_n$ – начального фазового сдвига СВЧ-волны по отношению к случаю для центра тяжести сгустка ультрарелятивистских e^+ , ускоряемых на самом гребне СВЧ-волны.

Распределение пучка электронов по СВЧ- фазам измерено в [Dzhilavyan L.Z., Obozny V.A., Ponomarev V.N. // Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. 1976. Seriya: Lineynye uskoriteli. Vypusk 1(2). P. 59] и показано на рисунке справа при некотором произвольном фазовом сдвиге $\Delta\phi$. FWHM $\approx (25-30)^\circ$

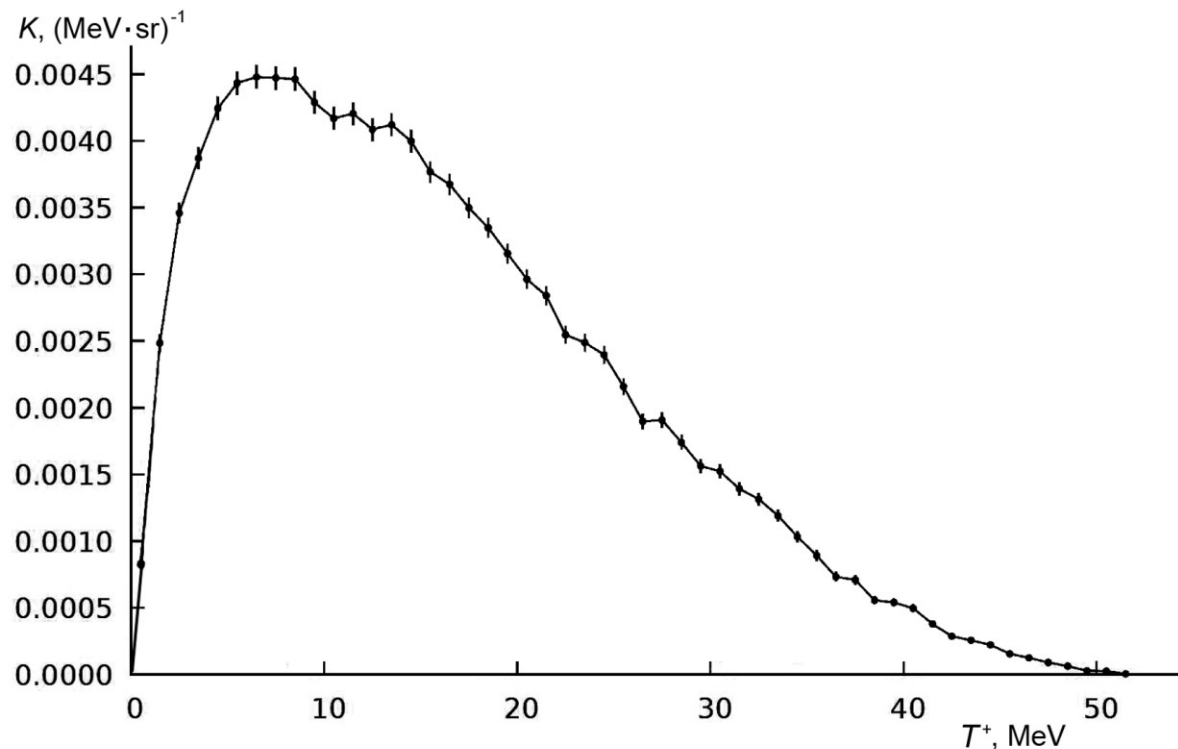


Параметры: секций ЛУЭ; e^- -пучка; мишени-конвертера. Коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$

Важнейшая характеристика e^+ -генерации в конвертерах – дифференциальный коэффициент конверсии $e^- \rightarrow e^+$ при полярных углах e^+ -испускания $\theta^+ \approx 0$:

$$K \equiv K(T^-, T^+, D, Z) = I^+ / (I^- \cdot \Delta\Omega^+ \cdot \Delta T^+), \quad (1)$$

где T^- и T^+ – кинетические энергии падающих e^- и испускаемых (начальных) e^+ ; D – толщина конвертера; Z – атомный номер материала конвертера; I^- и I^+ – средние токи падающих e^- и испускаемых (начальных) e^+ ; $\Delta\Omega^+$ и ΔT^+ – малые значения телесного угла и разброса энергии испускаемых e^+ при этом. Величины $K(T^-, T^+, D, Z)$ были оценены и рассчитаны в [Belyshev S.S., Dzhilavyan L.Z., Polonski A.L. Phys. Atom. Nucl. (2020)] и для существенного в настоящей работе случая $T^- = 55$ МэВ и оптимальной (при этом значении T^-) толщины Та-конвертера $D \cong 1.3X_0$ приведены на рисунке .



Использованная модель расчетов

Считается что: при e^+ -ускорении поперечные силы отсутствуют; продольная электрическая составляющая СВЧ-волны E не зависит от расстояния от оси секции z и есть:

$$E = E_0 \cdot f(z) \cdot \cos\varphi, \quad (2)$$

где: $\varphi = (2\pi ft - k_z z)$; t – время; $(k_z = 2\pi/\lambda)$ – модуль дольной составляющей волнового вектора в секции; функция $f(z) = \exp(-z / l_{\text{зат}})$ учитывает затухание СВЧ-волны вдоль оси z .

При моделировании динамики продольного e^+ -движения в секции ЗС проводилось методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности интегрирование уравнений движения:

$$\begin{cases} (d\varphi^+ / dz) = 2\pi f [(1 / v^+) - (1 / v_\phi)], \\ (dW^+ / dz) = e \cdot E_0 \cdot f(z) \cdot \cos\varphi^+, \end{cases} \quad (3)$$

где: v^+ и v_ϕ – z - составляющие скоростей ускоряемого e^+ и фазовой для СВЧ-волны; e – элементарный электрический заряд; $(W^+)_н$ и $(W^+)_к$ – полная энергия ускоряемого e^+ в начале и конце секции ЗС $(W^+)_л = (T^+)_н + \mu$ (μ – энергия покоя $e^-(e^+)$).

В модели для e^+ брались попарно начальные фазы $(\varphi^+)_{нj} \pm 0.5\Delta(\varphi^+)_{н}$ (в модели использовалось равномерное распределение по фазам $(\varphi^+)_{н}$ шириной $\Phi=30^\circ$ с шагом $\Delta(\varphi^+)_{н}$ до 1°) и полные энергии $(W^+)_{нl} \pm 0.5\Delta(W^+)_{н}$ на входе в секцию ЗС (в модели использовалось с шагом $\Delta(W^+)_{н}$ до 0.1 МэВ приближение зависимости $K(T^- = 55 \text{ МэВ}, (T^+)_{н})$ для $0.1 \text{ МэВ} \leq T^+ \leq 52 \text{ МэВ}$ в виде полинома).

При этом находились конечные значения фазы $(\varphi^+)_{кj,l} \pm 0.5\Delta(\varphi^+)_{к}$ и полной энергии $(W^+)_{кj,l} \pm 0.5\Delta(W^+)_{к}$ на выходе из секции ЗС, а также максимальные полярные углы $(\theta^+)_{нj,l}$ и $(\theta^+)_{кj,l}$:

$$(\theta^+)_{н} = a / \{s + [((W^+)_{н} / ((W^+)_{к} - (W^+)_{н})) \cdot L \cdot \ln((W^+)_{к} / (W^+)_{н})]\}, \quad (4)$$

$$(\theta^+)_{к} = (\theta^+)_{н} \cdot \{[(W^+)_{н}]^2 - \mu^2\}^{0.5} / [((W^+)_{к})^2 - \mu^2]^{0.5}, \quad (5)$$

Полученным e^+ для каждой пары $(\varphi^+)_{нj}$ и $(W^+)_{нl}$ при таких расчетах приписывались значения тока (при I – среднем токе падающих на конвертер e^-):

$$(i^+)_{j,l}((W^+)_{кj,l} \pm 0.5\Delta(W^+)_{к}) = I \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3, \quad (6)$$

Использованная модель расчетов

$$A_1 = [\Delta(\varphi^+)_{\text{H}}] / \Phi; \quad (7)$$

$$A_2 = K((W^+)_{\text{H}l} - \mu) \cdot \Delta(W^+)_{\text{H}}; \quad (8)$$

$$A_3 = \Delta[(\Omega^+)_{\text{H}}] \approx \pi[(\theta^+)_{\text{H}j,l}]^2. \quad (9)$$

При этом e^+ -ток для $(W^+)_{\text{K}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{K}}$ на выходе секции 3С:

$$(I^+)_{\text{K}}((W^+)_{\text{K}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{K}}) = \Sigma_{j,l}(i^+)_{j,l}((W^+)_{\text{K}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{K}}) \quad (10)$$

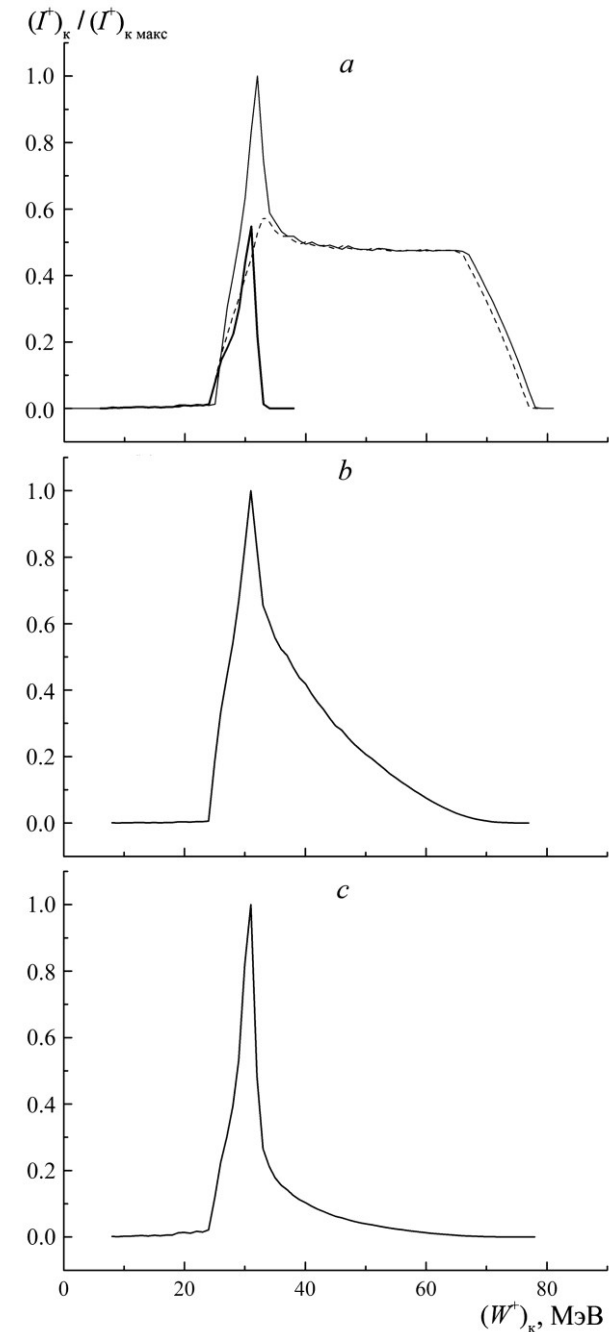
Каждое распределение $(I^+)_{\text{K}}((W^+)_{\text{K}}) \equiv (I^+)_{\text{K}}$ (по крайней мере, при фазовых сдвигах $\Delta\Phi_{\text{H}}$, близких к своим оптимальным значениям $\Delta\Phi_{\text{H опт}}$) имеет пик с максимумом $(I^+)_{\text{K макс}}((W^+)_{\text{K макс}}) \equiv (I^+)_{\text{K макс}}$.

Влияние разных факторов на форму зависимости $(I^+)_{\text{K}} / (I^+)_{\text{K макс}}$ от $(W^+)_{\text{K}}$ показано на рисунке справа, где:

a – A_1 взято из (7), $A_2 = \text{const}((W^+)_{\text{H}})$, $A_3 \equiv \text{const}$, сплошная тонкая кривая дана для полного интервала $0 < (W^+)_{\text{H}} \leq 52$ МэВ, для двух его частей более толстая сплошная кривая – для $0 < (W^+)_{\text{H}} \leq 5$ МэВ, а штриховая кривая – для $5 \text{ МэВ} < (W^+)_{\text{H}} \leq 52$ МэВ);

b – A_1 и A_2 взяты соответственно из (7) и (8), $A_3 \equiv \text{const}$;

c – A_1 , A_2 и A_3 взяты соответственно из (7), (8) и (9).



Использованная модель расчетов

Наряду с «прямой» задачей получения $(I^+)_k$ в зависимости от $(W^+)_k$ решалась путем соответствующей выборки и «обратная» задача для выделенного диапазона $[(W^+)_{k \text{ макс}} \pm \Delta(W^+)_{k \text{ макс}}]$ получения спектра для e^+ с конвертера $(I^+)_{\text{н}}((T^+)_{\text{н}})$, приведших к $(I^+)_{k \text{ макс}}$ в указанном диапазоне $(W^+)_k$.

На выходе «доускорителя» образуется пучок e^+ со сравнительно широким спектром их полных конечных энергий $(W^+)_k$. Обычно с помощью некой системы транспортировки, формирования и анализа (СТФА) из такого e^+ -пучка выделяется требуемая часть, содержащая только малый интервал $\Delta(W^+)_k$. В то же время выделяемый СТФА e^+ -пучок по сравнению с тем, который имеется на выходе «доускорителя», может быть «урезанным» и по своему поперечному четырехмерному эмиттансу с его объемом $V_{\text{эмитт}}$, формой и расположением, не позволяющими области эмиттанса уместиться полностью внутри четырехмерного поперечного аксептанса удовлетворяющей требованиям проводимых экспериментов СТФА с соответствующими объемом $V_{\text{эмитт}}$, формой и расположением. Для краткости такое положение обозначим здесь условно неравенством $V_{\text{эмитт}} > V_{\text{акс}}$. Если же такого «урезания» нет, обозначим это здесь условно неравенством $V_{\text{эмитт}} < V_{\text{акс}}$. В последнем случае для нахождения A_3 остается пригодным соотношение (9).

Для случаев $V_{\text{эмитт}} > V_{\text{акс}}$ в нашей модели используется довольно грубое приближение, согласно которому для аксептанса можно ввести некоторое эффективное предельное значение величины $(\theta_{\text{эфф}})^2$, которому должно соответствовать значение $(\theta_{k \text{ эфф}})^2$ для e^+ -пучка на выходе e^+ -«доускорителя». Отсюда появляется предельное значение для $(\theta_{\text{н эфф} j, l})^2$, которое согласно соотношению (5) есть:

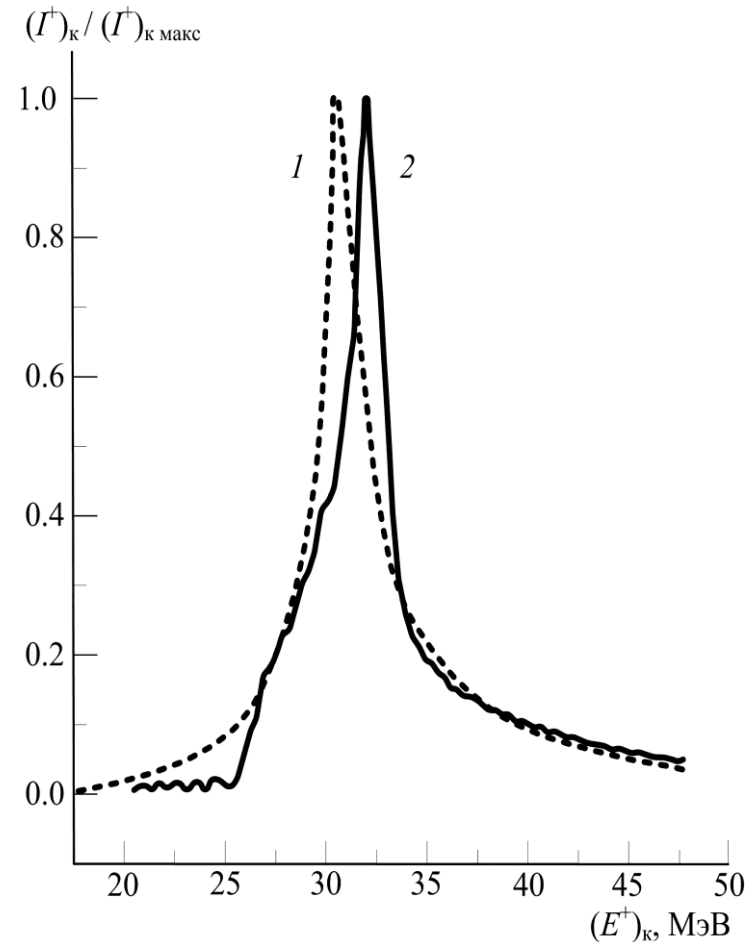
$$((\theta^+)_{\text{н эфф} j, l})^2 = (\theta_{\text{эфф}})^2 \{ [(W^+)_{k \text{ эфф} j, l}]^2 - \mu^2 \} / [(W^+)_{\text{н} l}]^2 - \mu^2 \}. \quad (11)$$

Таким образом, в выбранной модели при $V_{\text{эмитт}} > V_{\text{акс}}$ вместо A_3 согласно (9) надо брать $A_3 \text{ эфф}$:

$$A_3 \text{ эфф} = \Delta(\Omega^+)_{\text{н эфф} j, l} = \pi((\theta^+)_{\text{н эфф} j, l})^2 = \pi(\theta_{\text{эфф}})^2 \{ [(W^+)_{k \text{ эфф} j, l}]^2 - \mu^2 \} / [(W^+)_{\text{н} l}]^2 - \mu^2 \}. \quad (12)$$

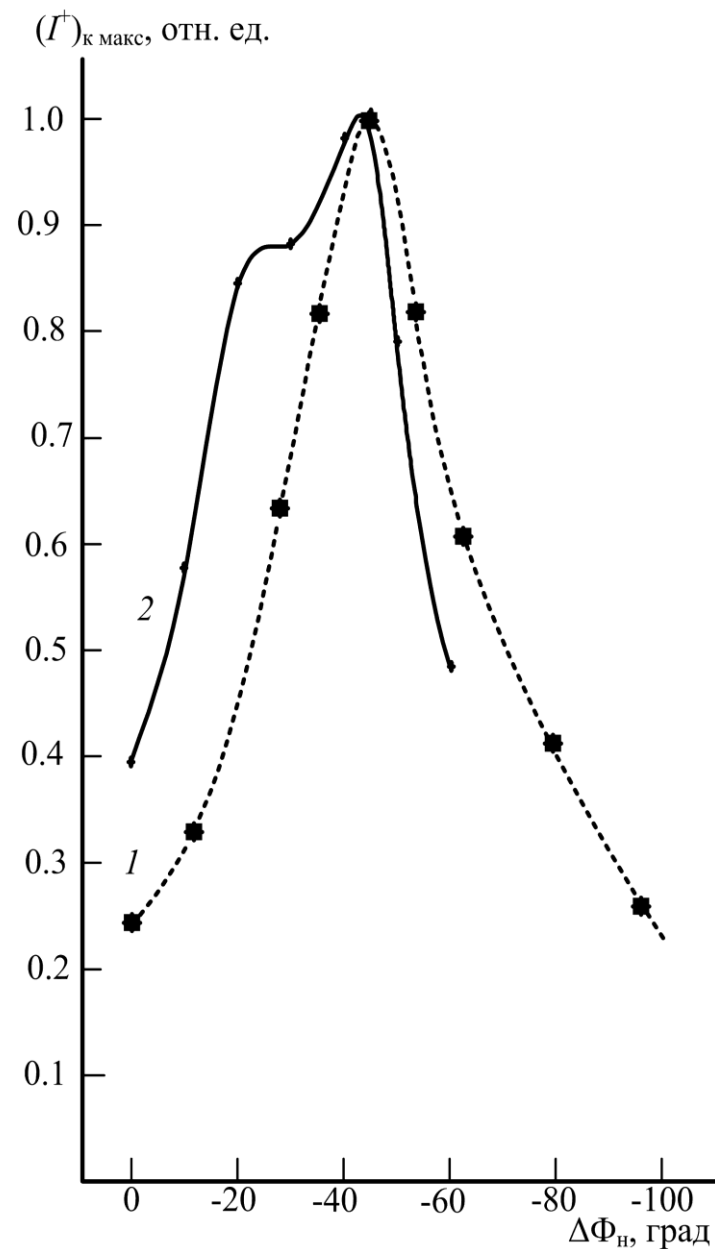
Для пучков ускоренных e^+ на рисунке справа представлены примеры формы распределений $(I^+)_{\text{к}}((W^+)_{\text{к}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{к}}) / (I^+)_{\text{к макс}}((W^+)_{\text{к макс}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{к}})$, измеренного на ЛУЭ-100 (кривая 1) и рассчитанного в этой работе по описанной модели (при $E_0 \cong 7.9 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-1}$) (кривая 2) когда $\Delta\Phi_{\text{н опт}} \approx -45^\circ$ (см. ниже), $(W^+)_{\text{к}} \cong 32 \text{ МэВ}$, а $\Delta(W^+)_{\text{к}} / (W^+)_{\text{к}} = 1\%$.

Наблюдается приемлемое согласие формы расчетной и экспериментальной кривых. Небольшой сдвиг расположения максимумов кривых 1 и 2 по энергии их расположения, как представляется, объясняется небольшим различием значений E_0 в эксперименте и расчете. Согласие указывает на определенную адекватность используемой модели



Результаты расчетов

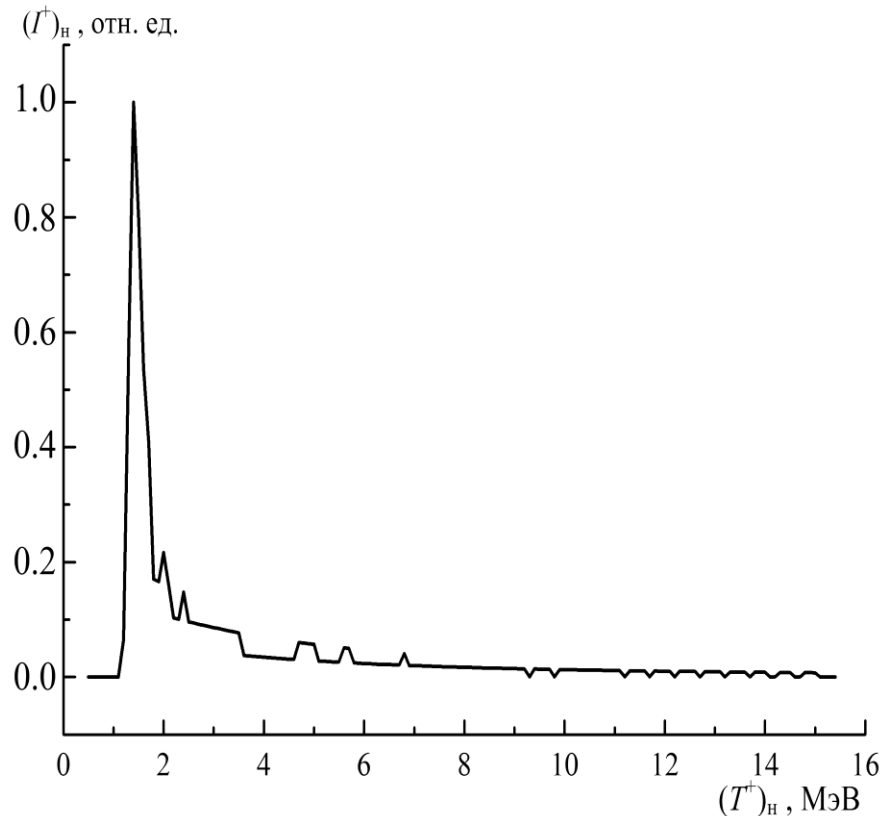
Дополнительным подтверждением адекватности модели служит согласие между экспериментальной (на ЛУЭ-100) и расчетной (при $E_0 \cong 7.9 \text{ МэВ} \cdot \text{м}^{-1}$) зависимостями от сдвига фазы СВЧ-волны в секции ЗС $\Delta\Phi_{\text{н}}$, приведенными на рисунке справа, где можно видеть, что максимум зависимости $(I^+)_{\text{к макс}}$ от сдвига фазы СВЧ-волны в секции ЗС достигается при оптимальном сдвиге фазы $\Delta\Phi_{\text{н опт}} \approx -(40-45)^\circ$, причем $(I^+)_{\text{к макс}}(\Delta\Phi_{\text{н}}=0) \approx (0.25-0.40)(I^+)_{\text{к макс}}(\Delta\Phi_{\text{н опт}} = -45^\circ)$. Надо отметить, что в ранних работах по получению e^+ с использованием их ускорения в последующей секции ЛУЭ обычно указывалось, что сдвиг фазы СВЧ-волны в этой секции по сравнению с оптимальным режимом ускорения в ней ультрарелятивистских e^- равен 180° , т.е. $\Delta\Phi_{\text{н опт}} = 0^\circ$ (см., например, [ХФТИ]). Хотя в работах на ЛУЭ-100 и в Giessen указывалось, что $\Delta\Phi_{\text{н опт}} \neq 0^\circ$, представляется, что этому обстоятельству следует уделить особое внимание, поскольку и позже продолжали появляться работы (см., например, [NBS]), в которых снова говорилось, что $\Delta\Phi_{\text{н опт}} = 0^\circ$.



Результаты расчетов

Для выяснения полученного оптимального фазового сдвига $\Delta\Phi_{\text{н опт}} \approx -45^\circ$ при $E_0 \cong 7.9 \text{ МэВ}\cdot\text{м}^{-1}$ был рассчитан спектр кинетических энергий e^+ на выходе из конвертера, которые далее ускорялись в секции ЗС и привели к $(I^+)_{\text{к макс}}((W^+)_{\text{к макс}} \pm 0.5\Delta(W^+)_{\text{к}})$ на выходе из секции ЗС, где $(W^+)_{\text{к макс}} = 32 \text{ МэВ}$ и $\Delta(W^+)_{\text{к макс}} = 0.32 \text{ МэВ}$. Рассчитанный для указанных условий спектр $(I^+)_{\text{н}}((T^+)_{\text{н}})$ приведен на рисунке. Видно, что существенный вклад в формирование пика $(I^+)_{\text{к макс}}$ приходит от e^+ с полными энергиями $(W^+)_{\text{к}} \approx 2 \text{ МэВ}$.

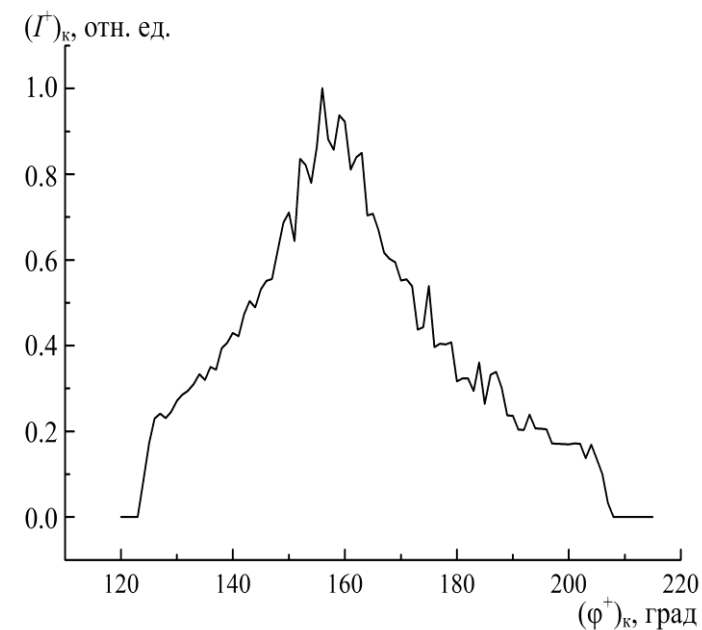
Так как скорость таких e^+ существенно меньше c , то для эффективного их захвата в секцию ЗС с $v_{\text{ф}} = c$ надо учесть их фазовое скольжение как по пути через свободный промежуток длиной s перед эффективным началом СВЧ-поля в секции ЗС, так и в начале их ускорения в этой секции. Надо, чтобы такие e^+ из конвертера инжектировались перед гребнем эффективной СВЧ-волны, «протянутой» в промежуток между секциями и ускоряющей ультрарелятивистские e^+ при $\Delta\Phi_{\text{н}} = 0$ на самом своем гребне. Знание этого спектра позволяет проводить выбор и расчеты согласующей и фокусирующей магнитной системы для e^+ -пучка после конвертера и в самом «доускорителе».



Результаты расчетов

Интересно рассмотреть распределение конечных фаз для e^+ -пучка на выходе из секции ЗС. Ширина такого распределения позволяет оценить перспективность использования устройств типа монохроматоров-дегруппирователей (как, например, в проекте для Еревана) для увеличения энергетической плотности полученного на ЛУЭ ускоренного e^+ -пучка. Используемая модель позволяет рассчитать это распределение, что тем более важно, так как измерения этого распределения затруднительны. На рисунке представлены результаты расчета $(I^+)_к((\varphi^+)_к)$ при: $E_0 \cong 7.9 \text{ МэВ}\cdot\text{м}^{-1}$; $\Delta\Phi_{\text{н опт}} \approx -45^\circ$; $(W^+)_к = (32 \pm 2.5) \text{ МэВ}$. Из-за фазового скольжения части ускоряемых e^+ полная ширина фазового распределения при указанных условиях возрастает до $\approx 80^\circ$, а максимум распределения смещен относительно гребня СВЧ-волны на $\approx 20^\circ$.

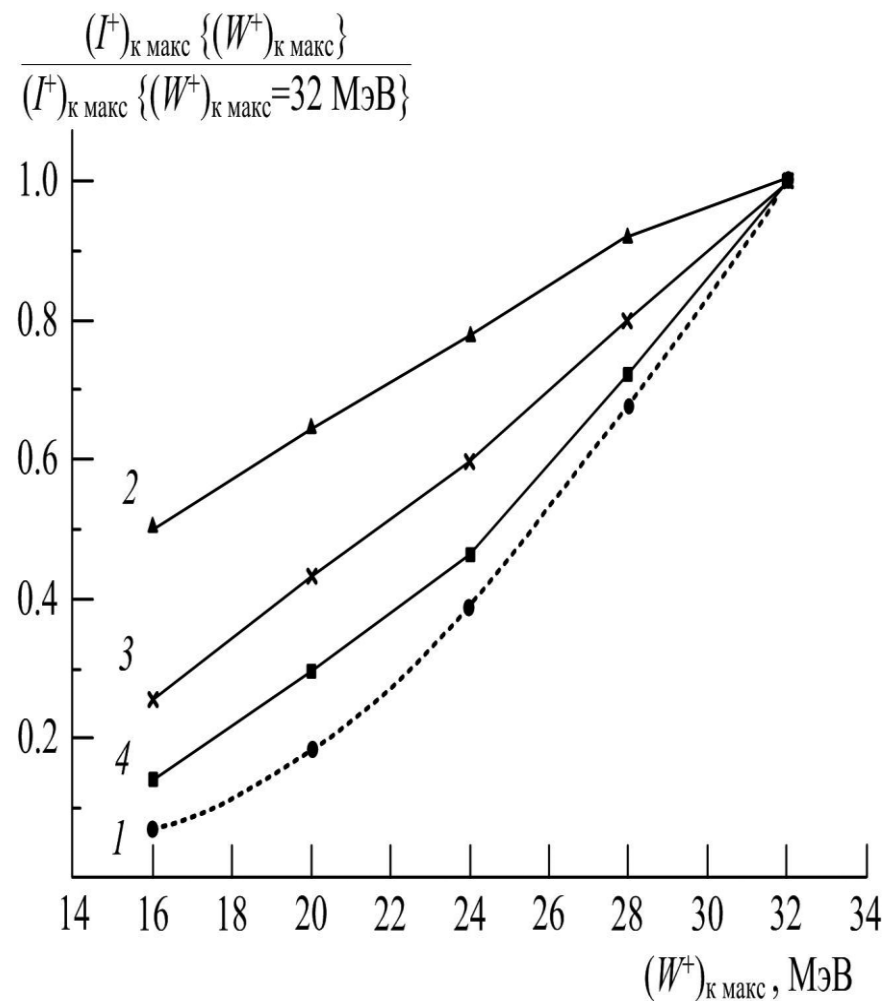
Поэтому для оптимальной перенастройки многосекционного ЛУЭ на e^+ -режим целесообразно использование не одного общего для всего «доускорителя» фазовращателя, как, например, было в ХФТИ, а двух (один – для первой секции «доускорителя», другой – для остальных его секций).



Результаты расчетов

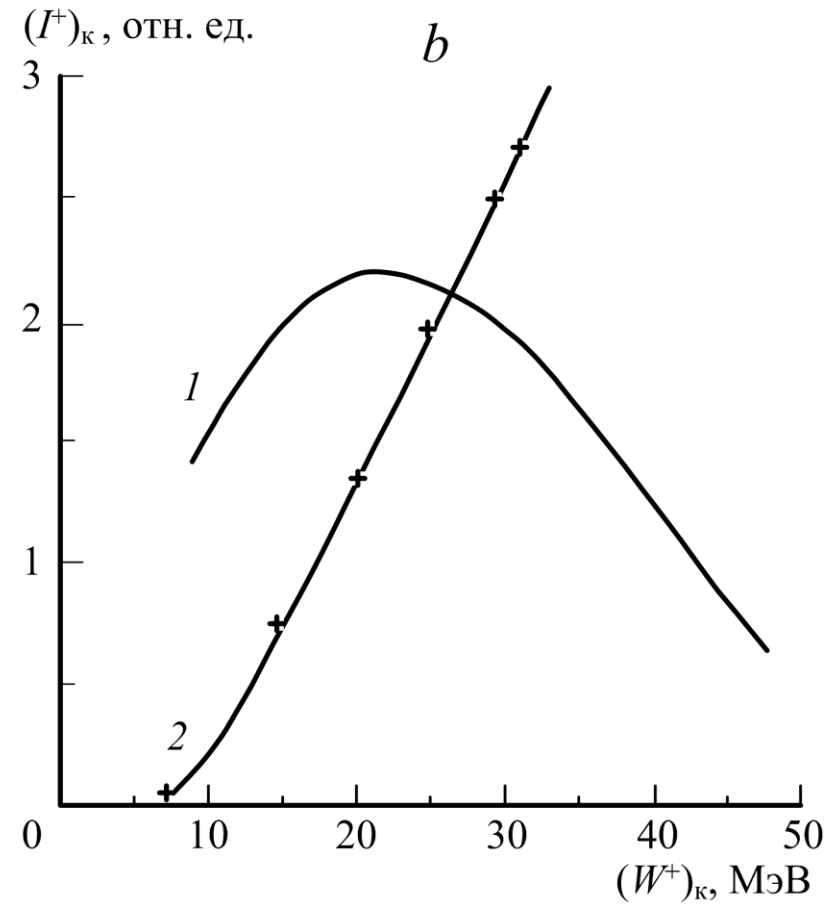
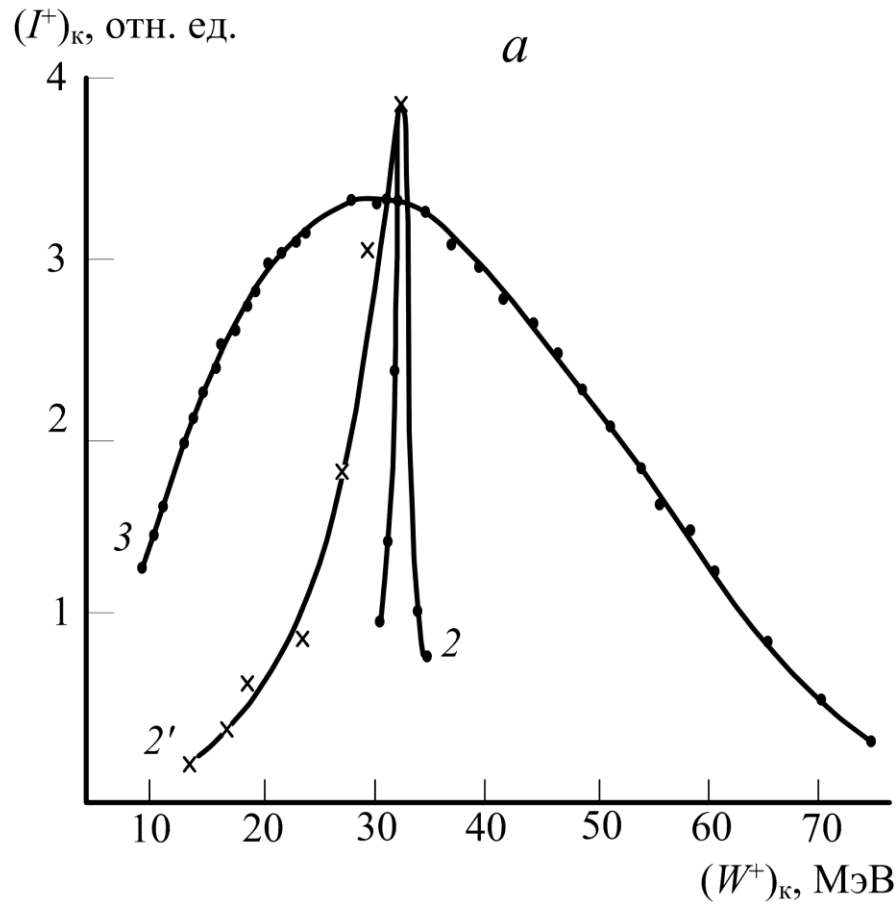
Для оптимизации возможностей решения задач экспериментальных ядернофизических исследований в области гигантских резонансов (ГР) в атомных ядрах важны измерения и расчеты e^+ -токов при: малых поперечных эмиттансах e^+ -пучков; интересующих e^+ -энергиях (скажем, $10 \text{ МэВ} \leq (W^+)_{\text{к макс}} \leq 35 \text{ МэВ}$ в условиях соответствующих им E_0 и $\Delta\Phi_{\text{н опт}}$); разбросах этих энергий (скажем, $(\Delta(W^+)_{\text{к}}) / (W^+)_{\text{к}} = 1\%$).

Такие измерения были проведены на ЛУЭ-100, а соответствующие расчеты при различных значениях E_0 и соответствующих им $(W^+)_{\text{к макс}}$ выполнены в данной работе. Их результаты сопоставляются друг с другом на рисунке справа. Можно считать, что расчеты в рамках использованной простой модели вполне удовлетворительно объясняют результаты эксперимента (особенно с учетом весьма приближенного учета соотношений поперечных эмиттансов e^+ -пучков $V_{\text{эмитт}}$ и поперечного аксептанса выбранной СТФА $V_{\text{акс}}$). На рисунке даны $(I^+)_{\text{к макс}}((W^+)_{\text{к макс}}) / (I^+)_{\text{к макс}}((W^+)_{\text{к макс}} = 32 \text{ МэВ})$: 1 – эксперимент при $(\Delta(W^+)_{\text{к макс}}) / (W^+)_{\text{к макс}} \cong \pm 0.5\%$ и $V_{\text{эмитт}} > V_{\text{акс}}$; 2 – расчет при $\Delta(W^+)_{\text{к макс}} = \text{const} = \pm 0.16 \text{ МэВ}$ и $V_{\text{эмитт}} < V_{\text{акс}}$; 3 – расчет при $(\Delta(W^+)_{\text{к макс}}) / (W^+)_{\text{к макс}} = \pm 0.5\%$ и $V_{\text{эмитт}} < V_{\text{акс}}$; 4 – расчет при $(\Delta(W^+)_{\text{к макс}}) / (W^+)_{\text{к макс}} = \pm 0.5\%$ и $V_{\text{эмитт}} > V_{\text{акс}}$.



Результаты расчетов

Сопоставление эффективности e^+ -ускорения при e^+ - получении : a – на ЛУЭ-100 с e^+ - ускорением (кривые 2 и 2') и без e^+ -ускорения (кривая 3); b – в Giessen с e^+ -ускорением (кривая 2) и в Saclay без e^+ -ускорения (кривая 1).



Результаты расчетов

Для задач исследований ГР при указанных выше условиях для одних и тех же или практически одинаковых как ЛУЭ, так и удовлетворяющих требованиям экспериментов СТФА проведено сопоставление при номинальных для выбранных ЛУЭ энергиях и одинаковых токах e^- , падающих на конвертеры, методов получения «усваиваемых» СТФА средних токов e^+ -пучков с и без e^+ -ускорения. Результаты для такого сопоставления для ЛУЭ-100 показаны на части *a* предыдущего рисунка (для справки см. также рис.1), где: кривые 2 и 2' получены с конвертером Та2 с e^+ -ускорением без магнитной e^+ -фокусировки в областях после конвертера и на e^+ -«доускорителе», причем кривая 2' дана для максимумов кривых типа 2; кривая 3 получена с внешним конвертером Та3 без e^+ -ускорения. Результаты для такого сопоставления также показаны на части *b* рисунка: кривая 1 – из Saclay без e^+ -ускорения; кривая 2 – из Giessen с e^+ -ускорением и магнитной e^+ -фокусировкой в областях после конвертера и на e^+ -«доускорителе». Отметим, что полученные без e^+ -ускорения $(I^+)_к$ ($W^+)_к$) являются приведенными к $(W^+)_н$ и $\Delta(W^+)_н/(W^+)_н = \text{const}$ зависимостями величин $K(T^-, (T^+)_н)$. При этом результаты без e^+ -ускорения можно использовать с привлечением данных о $K(T^-, (T^+)_н)$ в качестве референтных для анализа полученных на различных ЛУЭ полных коэффициентов конверсии $e^- \rightarrow e^+$ и для случаев использования e^+ -ускорения. Из частей рисунка *a* и *b* можно понять, что метод с e^+ -ускорением почти во всем интересующем для изучения ГР диапазоне энергий уступает методу без e^+ -ускорения и только примерно при $(W^+)_к > 30$ МэВ имеет преимущество. Формы кривых с и без e^+ -ускорения на части *a* рисунка близки к соответствующим им на части *b* рисунка, а некоторые различия, видимо, связаны с различиями номинальных e^- -энергий на внешних по отношению к ЛУЭ конвертерах (≈ 83 МэВ на ЛУЭ-100 и ≈ 70 МэВ на ЛУЭ в Giessen и Saclay). Несмотря на отличия, можно сделать важный вывод о малой эффективности использования магнитной e^+ -фокусировки в областях после конвертера и на e^+ -«доускорителе» в случае, если СТФА по необходимости выделяет только малые доли эмиттансов ускоренных e^+ -пучков.

Экспериментальным и расчетным путем выявлены важные особенности метода получения e^+ -пучков от межсекционных конвертерных мишеней ЛУЭ с использованием e^+ -ускорения в последующих секциях ЛУЭ, которые обусловлены как начальными параметрами e^+ -пучка из конвертера, так и динамикой процесса e^+ -ускорения в ЛУЭ.

Хотя результаты получены при отсутствии магнитной фокусировки для e^+ в ЛУЭ, они носят достаточно общий характер, что следует из сравнения с данными, например, работы [Kneissl U., et al. // Nucl. Instrum. and Methods 1975. V. 127. P. 1], где такая фокусировка использована.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!