

PACS:28.50.Dr;29.25.-t

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО УСКОРИТЕЛЯ В КАЧЕСТВЕ ДРАЙВЕРА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ

**В.В. Ганн, И.С. Гук, А.Н. Довбня, А.И. Калиниченко,
С.Г. Кононенко, А.С. Тарасенко**

*Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт
61108, ул. Академическая, 1, г. Харьков, Украина*

Поступила в редакцию 25 июня 2009 г.

Рассмотрено состояние исследований взаимодействия электронных пучков с подкритическими сборками. Приведены параметры электронных ускорителей, используемых в экспериментах. В связи с увеличением проектных мощностей электронных пучков до ста киловатт наибольшим нагрузкам будут подвергаться выходные окна ускорителей и конструкция нейтронообразующей мишени. Одним из важных механизмов разрушения является возбуждение термоакустических колебаний в материалах при прохождении мощных электронных пучков через эти конструкции. Проведены оценки влияния термоакустических напряжений на прочность элементов конверторов подкритических сборок.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: электронные пучки, подкритическая сборка, алюминий, вольфрам, уран, частота повторения, термоакустические колебания, предел прочности.

SOME QUESTIONS OF USE OF THE ELECTRON ACCELERATOR AS THE DRIVER OF THE SUBCRITICAL ASSEMBLY

V.V. Gann, A.N. Dovbnya, I.S. Guk, A.I. Kalinichenko, S.G. Kononenko, A.S. Tarasenko

National Science Centre "Kharkov Institute of Physics and Technology"

Akademicheskaya Str., 1, 61108, Kharkov, Ukraine

The state of research of electron beam interaction with subcritical assemblies is considered. Parameters of the electron accelerators used in experiments are given. In view of increase of estimated capacity of electron beams up to 100 kW, the outlet windows of accelerators and construction of a neutron-generating target will be subjected to the most loading. The thermoacoustic stress excitation by powerful electron beam passing through construction materials is one of important mechanisms of fracture. Estimates of influence of thermoacoustic stress on fastness of devices of subcritical assembly converters are spent.

KEY WORDS: electron beam, subcritical assembly, aluminum, tungsten, uranium, recurrence rate, thermoacoustic vibrations, strength threshold.

ДЕЯКІ ПИТАННЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСКОРЮВАЧА В ЯКОСТІ ДРАЙВЕРА ПІДКРИТИЧНОЇ ЗБІРКИ

В.В. Ганн, І.С. Гук, А.М. Довбня, О.І. Калініченко, С.Г. Кононенко, О.С. Тарасенко

Національний науковий центр Харківський фізико-технічний інститут

61108, вул. Академічна, 1, м. Харків, Україна

Розглянуто стан досліджень взаємодії електронних пучків з підкритичними збірками. Наведені параметри електронних прискорювачів, які використовуються в експериментах. У зв'язку зі збільшенням проектних потужностей електронних пучків до ста кіловатт найбільшим навантаженням будуть піддаватися вихідні вікна прискорювачів і конструкція нейтроногенеруючої мішені. Одним з важливих механізмів руйнування є збудження термоакустичних коливань у матеріалах при проходженні потужних електронних пучків через ці конструкції. Проведені оцінки впливу термоакустичної напруги на міцність елементів конверторів підкритичних збірок.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: електронні пучки, підкритична збірка, алюміній, вольфрам, уран, частота повторення, термоакустичні коливання, поріг міцності.

Создание безопасных энергетических ядерных установок, предназначенных как для производства электроэнергии, так и для трансмутации продуктов работы тепловых ядерных реакторов является одной из приоритетных задач ядерной энергетики. Уже в одном из первых предложений по созданию таких установок были описаны все элементы будущих реакторов [1]. Основой таких установок является подкритический ядерный реактор на быстрых нейтронах. В качестве драйвера такого реактора предполагается использовать протонный ускоритель на энергию 600-1000 МэВ с током до 20 мА [1, 2]. Протонный пучок через вольфрамовое окно попадает на нейтронообразующую мишень, в качестве которой используется свинец. Для уменьшения тепловых ударов в материале окна, мишени и подкритической сборке наиболее предпочтительным является непрерывный во времени пучок протонов [1, 2]. Мощный ускоритель с непрерывным пучком значительно проще в работе и имеет более стабильные во времени параметры.

Создание столь мощных ускорителей протонов является сложной и дорогой задачей. Для проверки основных идей, заложенных в основу будущих установок, можно использовать также электронные ускорители. Как показано в работе [3], для получения потоков нейтронов менее $1 \cdot 10^{16}$ нейтронов в секунду, электронные ускорители требуют значительно меньших затрат на создание установки.

В мире имеется опыт по использованию подкритических сборок, управляемых электронными ускорителями, для создания импульсных источников нейтронов. Так в Дубне достаточно долго

эксплуатировался нейтронный источник, состоявший из линейного ускорителя электронов LUE-40 на энергию 40 МэВ и подкритического реактора IBR-30 [4]. В настоящее время там же планируется запустить источник нейтронов на основе линейного ускорителя на 200 МэВ [5]. Средняя мощность пучка 10 кВт, частота повторения импульсов 150 Гц, длительность импульса 100 нс.

Начаты работы по изучению взаимодействия электронного пучка с подкритической сборкой в университетах США [6, 7]. В Idaho Accelerator Center of the Idaho State University используется линейный ускоритель электронов на энергию 30 МэВ со средней мощностью в пучке менее 1 кВт, частота посылок 7 Гц, длительность импульса 10 нс. В Texas A&M University для экспериментов используется 20 МэВ ускоритель с частотой посылок 180 Гц, средняя мощность в пучке 2 кВт, длительность импульса 2 мкс. Программой исследований предполагается создание новых ускорителей на энергию 19-33 МэВ, частота посылок до 360 Гц, длительность импульса 8 мкс, мощность в пучке до 42 кВт.

В НИЦ ХФТИ также рассматривается возможность создания подкритической сборки, управляемой электронным ускорителем [9-13]. Предлагается два варианта драйвера. В качестве первого рассматривается импульсный ускоритель на энергию 85-130 МэВ, мощностью до 100 кВт в пучке, частота повторения импульсов 100-150 Гц, длительность импульса 3-16 мкс [10]. Другой вариант драйвера предполагает использование сверхпроводящей ускоряющей структуры TESLA, работающей в непрерывном режиме. Энергия электронов - 130 МэВ, мощность в пучке 130 кВт, частота повторения импульсов 1 и 13 МГц. Длительность импульсов 5-25 пс. Эти проекты имеют существенно большую мощность пучка, взаимодействующую с подкритической сборкой. Импульсная структура пучка этих драйверов может оказать существенное воздействие на некоторые наиболее подверженные влиянию пучка элементы установки. В первую очередь это относится к окну вакуумной камеры ускорителя и материалу мишени. Окно вакуумной камеры предполагается изготовить из алюминия толщиной около 2 мм. В качестве нейтронообразующей мишени предполагается использовать набор дисков толщиной от 4 до 25 мм, диаметром около 6 см, охлаждаемых водой [14]. Материал дисков - природный уран или вольфрам.

Нагрев окна вакуумной камеры и конвертера импульсным пучком проникающего излучения приводит к возбуждению термоакустических напряжений, уменьшающих срок службы конвертера. В частности, растягивающие напряжения, превышающие динамический предел прочности материала σ_d , вызывают разрушение мишени, имеющее характер растрескивания или откалывания фрагментов. Указанный эффект может происходить при температурах, меньших температуры плавления.

Даже если возникающие напряжения не превышают σ_d , но имеют характер длительных колебаний, они могут приводить к усталости и разрушению материалов. Различают малоцикловую усталость (с частотой нагружения 0.1 – 5 Гц) и многоцикловую усталость (с частотой нагружения 20 – 50 Гц).

В условиях импульсного электронного облучения мишеней (с частотой 100-300 Гц) возникает необходимость анализа выносливости материалов по отношению к многоцикловой усталости. Выносливость материалов характеризуется следующими параметрами:

σ_{-1} – предел выносливости материала, - наибольшее напряжение циклического симметричного изгиба, при котором не происходит усталостного разрушения образца после сколь угодно большого числа циклов нагружения;

σ_{-1}^p – предел выносливости при одностороннем сжатии (растяжении);

τ_{-1} – предел выносливости при кручении;

N – долговечность – число циклов, выдерживаемых образцом до разрушения (при заданной амплитуде напряжения).

Предел выносливости материала зависит от формы и размеров образца, от частоты нагружения и температуры испытаний. Практически предел выносливости материала определяют на базе $N = 2 \cdot 10^7$ циклов. По порядку величины предел выносливости материала составляет половину его предела прочности: $\sigma_{-1} \sim 0,5 \sigma_B$, а предел выносливости материала при одностороннем сжатии - $\sigma_{-1}^p \sim 0,3 - 0,4 \sigma_B$.

Характерным для испытания материала на многоцикловую усталость является то, что его разрушение происходит в упругой области деформирования.

Величина σ_{-1} для сталей составляет 500-700 МПа, для высоконикелевых сплавов – 250-350 МПа.

При термоциклировании анизотропных поликристаллических материалов, таких как металлический уран, вследствие большой анизотропии коэффициента термического расширения, в микроструктурах возникают дополнительные внутренние микронапряжения, которые приводят к усталостным разрушениям.

Алюминий, его сплавы и некоторые другие материалы разрушаются при циклической нагрузке любой амплитуды, если нагрузка действует достаточно долго. Зависимость числа разрушающих циклов от амплитуды гармонической нагрузки задается т.н. кривой Вёлера (Wöhler), являющейся результатом обработки экспериментальных данных. Однако при малых нагрузках число циклов, приводящих к разрушению, столь велико, что заведомо превышает срок эксплуатации детали [16].

С учетом вышеизложенного, предел выносливости может быть ориентировочно принят для вольфрама ~

500 МПа, тантала ~ 200 МПа, урана ~ 100 МПа и чистого алюминия ~20 МПа.

Целью настоящей работы является теоретическое исследование возбуждения термоакустических колебаний в тонких дисковидных мишенях, облучаемых импульсным пучком релятивистских электронов. Для конкретного набора параметров излучения и мишени анализируется возможность механического разрушения мишени под действием периодически повторяющихся импульсов излучения.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ТЕРМОАКУСТИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КОНВЕРТЕРЕ ИМПУЛЬСНЫМ ПУЧКОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Теоретическая модель

Пусть однородный в поперечном направлении импульсный пучок релятивистских электронов распространяется вдоль оси z , совпадающей с осью симметрии мишени. Задача решается при упрощающих предположениях

$$h \ll \min \left\{ \frac{E}{\chi(z, E)}, D \right\}. \quad (1)$$

Здесь h и D – толщина и диаметр мишени, E и $\chi(z, E)$ – энергия и удельные энергетические потери частицы пучка в веществе мишени, релаксирующие в температуру. Предполагается, что, с достаточной степенью точности, функцию $\chi(z, E)$, можно аппроксимировать константой $\chi = a\rho$, равной удельным ионизационным потерям частицы пучка. Здесь $a \approx 2$ МэВ·см²/г, ρ – плотность вещества мишени.

В принятом приближении поле тепловых источников в мишени можно полагать равномерным по всей мишени, а возникающие термоакустические напряжения представить в виде суперпозиции одномерных напряжений $\sigma_z(z, t) \equiv -\sigma_{zz}(z, t)$ в бесконечном плоском слое толщиной h , и радиальных напряжений, $\sigma_r(r, t) \equiv -\sigma_{rr}(r, t)$, распространяющихся перпендикулярно оси диска. (Напряжения сжатия соответствуют положительным значениям функций σ_z и σ_r).

Напряжения $\sigma_z(z, t)$ в слое со свободными границами, вычисляются в [15]. Максимальные сжимающие и растягивающие напряжения при любых реалистических временных зависимостях тока пучка реализуются в срединной плоскости слоя $z = h/2$. Если слой окружен материалом с акустической жесткостью $\rho_e s_e$, отличной от акустической жесткости материала слоя ρs , то полученное в [15] выражение для амплитуды акустических напряжений в срединной плоскости слоя трансформируется к виду:

$$\sigma_z(t) = \sigma_{in}(t) - \sum_{n=0}^{\infty} D^n \sigma_e \left(t - \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{h}{s} \right) \Phi \left(t - \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{h}{s} \right), \quad (2)$$

где

$$\sigma_{in}(t) = \Gamma \chi J \int_{\max\{0, t-h/2s\}}^t F(\tau) d\tau, \quad (3)$$

$$\sigma_e(t) = \Gamma \chi J \int_{\max\{0, t-h/s\}}^t F(\tau) d\tau, \quad (4)$$

$$\Phi(t) = \begin{cases} 0, & t < 0; \\ 1, & t \geq 0, \end{cases} \quad (5)$$

s и Γ – продольная скорость звука и параметр Грюнайзена материала мишени, соответственно; J – флюенс электронного пучка. Коэффициент отражения

$$D = \frac{\rho_e s_e - \rho s}{\rho_e s_e + \rho s} \quad (6)$$

отрицателен, если $\rho_e s_e < \rho s$. Нормированная на единицу функция $F(t)$ определяет временную зависимость тока пучка. При расчетах использовалась следующая однопараметрическая аппроксимация:

$$F(t) = \frac{16}{T^2} t e^{-\frac{4t}{T}}. \quad (7)$$

Здесь T – эффективная длительность пучка, равная времени, за которое проходит ~90% электронов пучка. Вид функции $F(t)$ показан на рис. 1.

Результаты расчетов и обсуждение

Расчет термоакустических напряжений в вольфрамовых слоях различной толщины проводился для электронного пучка длительностью $T = 2$ мкс, радиусом $R = 2,5$ см, с энергией электронов $E = 100$ МэВ, средней мощностью $W = 10^5$ Вт и частоте следования импульсов $f = 100$ Гц. Расчет электронного флюенса дает:

$$J = \frac{W}{\pi R^2 f E} = 3,2 \cdot 10^{12} \frac{\text{электронов}}{\text{см}^2}. \quad (8)$$

Также при расчетах использовались следующие значения параметров: $s = 5,46 \cdot 10^5$ см/с; $\rho = 19,35$ г/см³; $\Gamma = 1,6$. При расчете коэффициента отражения D предполагалось, что вольфрамовый конвертер погружен в воду ($s_e = 1,45 \cdot 10^5$ см/с, $\rho_e = 1$ г/см³), что дает $D = 0,973$. Результаты расчетов амплитуд термоакустических напряжений σ_z (T) в срединной плоскости вольфрамовых конвертеров различной толщины приведены на рис. 2.

Как видно из рисунка, возбуждаемые в конвертере акустические напряжения являются слабо затухающими почти периодическими колебаниями с частотой $s/2h$ от ~ 60 КГц до $\sim 1,5$ МГц. Некоторые отклонения от периодичности наблюдаются только во время действия пучка $t \leq T$.

Максимальные растягивающие напряжения составляют величины ~ 5 ; 12; 21 и 31 МПа для конвертеров толщиной 0,3; 0,5; 0,8 и 2,0 см, соответственно. Величина напряжений монотонно возрастает с толщиной конвертера h , выходя на насыщение при $h > sT$ (см. рис. 3). Из приведенной зависимости также следует, что возрастание длительности импульса T ведет к уменьшению напряжений в конвертере.

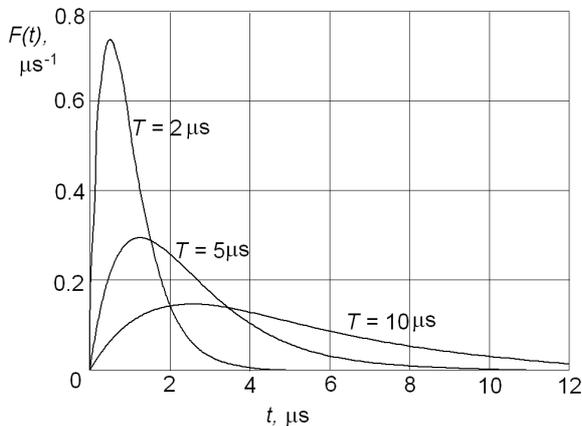


Рис. 1. Временная зависимость $F(t)$ тока пучка при различных длительностях T пучка.

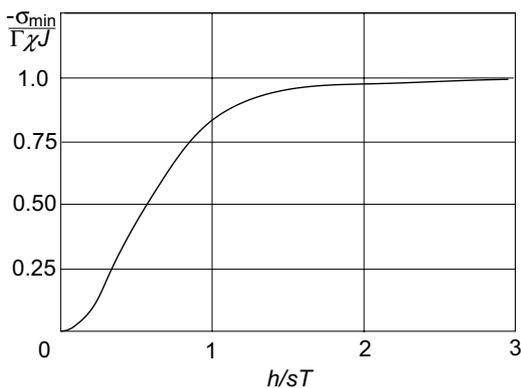


Рис. 3. Зависимость максимальных напряжений от приведенной толщины конвертера h/sT .

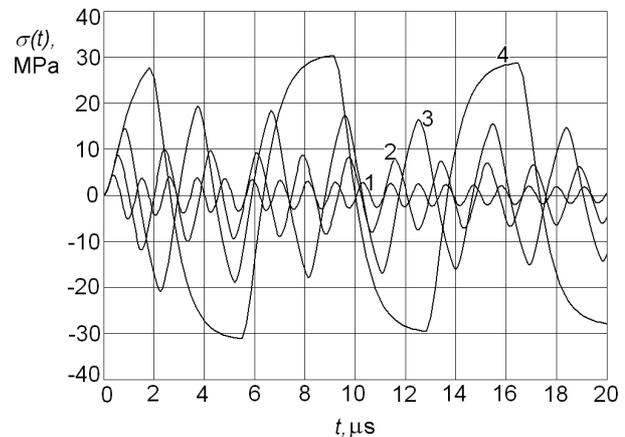


Рис. 2. Акустические напряжения $\sigma_z \equiv -\sigma_{zz}$ в центральной плоскости дисковидного вольфрамового конвертера с толщиной $h = 0,3$; 0,5; 0,8 и 2,0 см (кривые 1 – 4, соответственно), возбуждаемые импульсным пучком релятивистских электронов с флюенсом $J = 3,18 \cdot 10^{12}$ см⁻² и длительностью импульса $T = 2$ мкс.

Оценка напряжений радиальных колебаний мишени σ_r , полученная в приближении эквивалентного плоского слоя толщиной $h = 2R$, показывает, что величина σ_r близка к максимальным значениям, полученным для компоненты σ_z [18].

Амплитуда одномерных колебаний σ_z в алюминиевом окне вакуумной камеры толщиной 0,2 см, рассчитанная при тех же параметрах электронного пучка, относительно мала: $\sim 0,3$ МПа. Напряжения радиальных колебаний в тонком алюминиевом диске могут достигать величины ~ 3 МПа, все еще малой, по сравнению с условным пределом выносливости для алюминия (≥ 20 МПа). Отметим, что величину

растягивающих радиальных напряжений и длительность их колебаний легко уменьшить, обеспечив отвод напряжений в акустически согласованную среду.

Таким образом, колебания пластин конвертера и окна вакуумной камеры приводят к растягивающим напряжениям, значительно меньшим динамического предела прочности металлов $\sigma_d \geq 1$ ГПа. Это практически исключает возможность откольного разрушения конвертера при флюенсе электронного пучка $J < 10^{13}$ см⁻². Более того, возникающие переменные напряжения в 5 – 20 раз меньше и пределов выносливости для

рассматриваемых материалов (Al, W), приведенных выше. Следует подчеркнуть, что этот вывод может измениться при наличии в теле конвертера дефектов (трещин или каверн). Случай уранового конвертера требует дополнительных исследований. Это связано с резко выраженной анизотропией механических свойств поликристаллического урана, что увеличивает опасность межкристаллитного разрушения при термоциклировании.

Поскольку частоты колебаний дисков конвертера относительно невелики, то основным фактором уменьшения амплитуды колебаний является не поглощение звука, а частичный выход звуковой волны в окружающую воду. Учитывая, что отношение амплитуд двух последовательных импульсов равно $|D| = 0,973$,

получаем, что амплитуда колебаний уменьшается в e раз за время $t_{1/e} \approx \frac{h}{s} \cdot \frac{1}{1+D} = \frac{2h}{s_e} \frac{\rho}{\rho_e} \sim (80 - 500) \text{ мкс}$. Это

время значительно меньше скважности импульсов излучения $f^{-1} \sim 10^4 \text{ мкс}$, поэтому периодическая нагрузка действует на конвертер примерно лишь $(1 - 5) \%$ от общего времени действия излучения. Так, если число разрушающих циклов, в зависимости от амплитуды σ , задается функцией $N(\sigma)$, то время жизни конвертера за счет усталостного старения составляет величину $T_{\text{life}} = 2hN(\sigma)/(sf t_{1/e})$.

В случае пучков с высокой частотой следования импульсов ($f = 1 \text{ МГц}$ или 13 МГц при заряде в импульсе, соответственно, 1 нк и $0,077 \text{ нк}$) возбуждаемые напряжения, по крайней мере, на 3 порядка меньше рассмотренных выше. По-видимому, они не представляют серьезной угрозы для конвертера. Относительно опасным может быть лишь случайное попадание в режим резонанса при выборе толщин дисков, когда частота собственных колебаний дисков $s/2h \sim 0,1 - 1 \text{ МГц}$ равна или кратна частоте следования электронных импульсов f [17]. При этом резонансная толщина пластины определяется соотношением $h_r = s/2f$. Так, полагая $f = 1 \text{ МГц}$, получаем для резонансной толщины h_r пластины из вольфрама, урана или алюминия $0,273 \text{ см}$; $0,176 \text{ см}$ и $0,313 \text{ см}$, соответственно.

ВЫВОДЫ

1. Импульсный пучок релятивистских электронов возбуждает в пластинах конвертера периодические затухающие колебания с характерной частотой $s/2h$ от $\sim 60 \text{ КГц}$ до $\sim 1,5 \text{ МГц}$ и максимальной величиной растягивающих напряжений $\sigma_{\text{max}} = \Gamma J \chi \approx 31 \text{ МПа}$ (вольфрамовый конвертер). Амплитуда колебаний изменяется с длительностью пучка $T \gg h/s$ по закону $\sigma \sim \sigma_{\text{max}} h/sT$. Декремент затухания определяется потерями энергии колебаний в окружающую среду (вода).

2. Возбуждаемые термоакустические напряжения значительно меньше динамического предела прочности σ_d (для металлов $\sigma_d > 1 \text{ ГПа}$), что исключает возможность откольного разрушения конвертера при флюенсе электронного пучка $J < 10^{13} \text{ см}^{-2}$.

3. Возбуждаемые термоакустические напряжения в $\sim 5 - 20$ раз меньше пределов выносливости для материалов пластин конвертера (W) и окна вакуумной камеры (Al). Вывод относится к случаю бездефектных материалов. Случай уранового конвертера требует дополнительных исследований влияния анизотропии механических свойств поликристаллического урана при термоциклировании.

4. В случае пучков с высокой частотой следования импульсов ($f > 1 \text{ МГц}$) следует избегать толщин пластин конвертера $h_r = s/2f$, при которых возникает резонансное нарастание колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 T
2. J-L. Biarrotte, High power cw superconducting linacs for EURISOL and XADS // Proceedings of LINAC 2004, Lübeck, Germany, p.275-277.
3. D. Ridicas, H. Safa, M.-L. Giacri. Conceptual study of neutron irradiator driven by electron accelerator // Seven Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product, Jeju, Korea, 14-16 Oct. 2002.
4. <http://nfdfn.jinr.ru/about/history.html>
5. <http://nfdfn.jinr.ru/flnph/iren/iren.html>
6. <http://www.iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>
7. Sean O Kelly, Brad Hurst, Taylor Green, RACE LP at The University of Texas: Lessons Learned, <http://www.iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>
8. Frank Harmon, Accelerators for High Power RACE, <http://www.iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>
9. Proceedings. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Kharkiv, Feb. 24-25, 2005, 246 p.
10. M. Ayzatskiy, A. Dovbnya, V. Mytrochenko Physical study of power electron linac for neutron source // Proc. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Kharkiv, Feb. 24-25, 2005, p. 47-66.
11. I. Guk, A.N. Dovbnya, S. Kononenko, F. Peev, A. Tarasenko, Jan Botman, Marnix Van der Wiel. Use recirculator "SALO" in the mode of the neutron source // Proceedings 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, May 16-20, 2005,

- p.2354-2356.
12. Yu.M. Arkatov, A.N. Dovbnya, A.V. Glamazdin, I.S. Guk, S.G. Kononenko, M. van der Wiel, J.I.M. Botman F.A. Peev, A.S. Tarasenko. "SALO" PROJECT, NSC KIPT, Kharkiv, 2005, 104 p.
 13. M.I. Bratchenko, V.V. Gann, I.S. Guk, A.N. Dovbnya, S.V. Dyuldya, S.G. Kononenko, F.A. Peev, A.S. Tarasenko, M. van der Wiel, J.I.M. Botman, Superconducting driver for sub-critical assembly, International Conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy" May 29 - June 3, 2006. Kyiv, UKRAINE, proceedings, part 11, P.622-631.
 14. Yousry Gohar, James Bailey, Henry Belch, Dmitri Naberezhnev, Philip Strons, Igor Bolshinsky Accelerator driven sub-critical assembly facility // Proc. of Ukraine-USA Meeting "Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility", Kharkiv, Feb. 24-25, 2005. P. 67-180.
 15. A.I. Kalinichenko, V.T. Lazurik, I.I. Zalyubovsky Introduction to Radiation Acoustics. In series: The Physics and Technology of Particle and Photon Beams, Vol. 9, Harwood Academic Publishers, 2001, 239 P.
 16. W. Schutz A history of fatigue //Engineering Fracture Mechanics. - 1996. - Vol.54. - P.263-300.
 17. А.И. Калиниченко Радиационно-акустический резонанс при взаимодействии пучка излучения с ограниченным твердым телом // Акустический журнал. – 1990. - Т.36, В.5. - С.952-953.
 18. В.В. Ганн Упругие напряжения в диске, облучаемом импульсным пучком высокоэнергетических электронов // Тезисы докладов VI Конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям, 25-29 февраля 2008г. Харьков, с. 71.