

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЛИТУДЫ В.Ч.-НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУАНТАХ ЦИКЛОТРОНОВ ЛЯР ОИЯИ ПО КРАЮ СПЕКТРА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2020 г. А. Т. Исатов^{a,b,*}, Ю. Г. Тетерев^a, Р. К. Кабытаева^{a,b},
С. В. Митрофанов^a, И. В. Калагин^a

^a Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория ядерных реакций имени Г.Н. Флерова
Россия, 141980, Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, 6

^b Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева
Казахстан, 010000, Нур-Султан, ул. Сатпаева, 2

*e-mail: issatov@jinr.ru

Поступила в редакцию 29.08.2019 г.

После доработки 29.08.2019 г.

Принята к публикации 09.09.2019 г.

Представлены методика и результаты измерений амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов ЛЯР ОИЯИ по краю спектра тормозного излучения. Измерения спектров тормозного излучения проводились с помощью полупроводникового детектора XR-100T-CdTe фирмы Amptek. Методика опробована на изохронном циклотроне У-400М и применена при пусконаладочных работах циклотрона ДЦ-280 для проведения настройки высокочастотной ускоряющей системы на рабочий режим.

DOI: 10.31857/S0032816220010152

ВВЕДЕНИЕ

В ЛЯР ОИЯИ работают изохронные циклотроны, в которых для ускорения ионов используется высокочастотная ускоряющая система на основе дуантов с четвертьволновыми резонаторами.

Для настройки циклотрона на режим ускорения ионов с минимальными потерями в центральной области (максимальный коэффициент захвата пучка в ускорение) и обеспечения центровки ускоряемого пучка амплитуда в.ч.-напряжения на дуантах должна соответствовать расчетному значению. Прямое измерение амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов методом введения в объемный резонансный контур дополнительных измерительных цепей удобно для оперативной работы, но не дает достоверных результатов. Для получения достоверной информации о напряжении на дуантах измерительные цепи необходимо калибровать. Для калибровки предлагается использовать методику, описанную в [1–4]. Предварительные результаты измерений амплитуды в.ч.-напряжения данным методом на дуантах циклотрона У-400М приведены в работе [5].

Измерение амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов представляет научный и практический интерес, в частности, для подтвержде-

ния результатов расчетов, используемых при проектировании резонансных систем ускорителей [2].

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ АМПЛИТУДЫ В.Ч.-НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУАНТАХ ЦИКЛОТРОНОВ ЛЯР ОИЯИ

Оперативный контроль амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов ЛЯР осуществляется с помощью пикап-электродов, которые расположены сверху и снизу дуантов и установлены в отверстия в плакировке (антидуанте). Например, на циклотроне У-400М установлено 8 пикап-электродов на один дуант: 4 сверху и 4 снизу. Расположение пикап-электродов вблизи дуанта показано на рис. 1.

Пикап-электроды не имеют прямого контакта с дуантами, поэтому проводится измерение наведенного на них напряжения на осциллографе и приборах в системе управления циклотрона. Приборы откалиброваны с помощью высоковольтного электростатического вольтметра, который был подключен непосредственно к дуантам. Диапазон измерения вольтметра составляет от 0.1 до 20 кВ. Экспериментально проводилось несколько измерений соответствия показаний напряжения на пикап-электродах и показаний электростатиче-

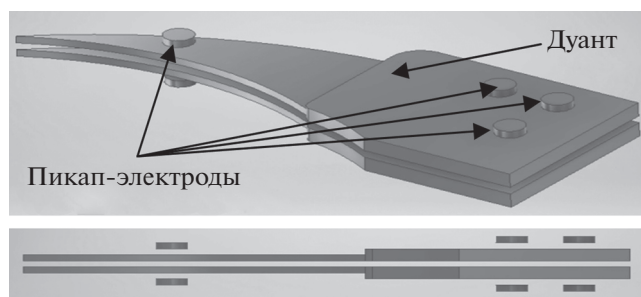


Рис. 1. Расположение пикап-электродов для оперативного контроля амплитуды в.ч.-напряжения на циклотроне У-400М.

ского вольтметра. Результаты калибровки экстраполировались до напряжения 130 кВ.

Этот метод калибровки имеет два основных недостатка: калибровка проводится не во всем диапазоне напряжений на дуанте, а только до 20 кВ, и при прямом контакте электростатического вольтметра с дуантами изменяются характеристики резонансной системы, что приводит к дополнительным погрешностям. Чтобы получить достоверную информацию об амплитуде в.ч.-напряжения на дуантах циклотрона, предложено использовать метод измерения ее по краю спектра тормозного излучения. Он не приводит к изменениям характеристик резонансной системы и позволяет провести измерения во всем диапазоне амплитуд в.ч.-напряжений.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ В.Ч.-НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУАНТАХ ЦИКЛОТРОНОВ ПО СПЕКТРУ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В высокочастотном электрическом поле сотни киловольт на сантиметр с поверхности дуантов происходит эмиссия электронов. В электрическом поле они ускоряются. При бомбардировке поверхности дуантов электронами образуется тормозное излучение. Максимальная энергия излучения соответствует амплитуде в.ч.-напряжения резонаторов. Регистрируя спектр данного излучения, можно определить амплитуду в.ч.-напряжения.

Измерение спектра тормозного излучения от дуантов циклотрона проходило через специально изготовленное окно из титановой фольги, центр которого располагался в медианной плоскости с возможностью регистрации излучения из центральной области ускорителя. Толщина фольги — 70 мкм, что позволяло регистрировать рентгеновское излучение с энергией >5 кэВ. Окно устанавливалось как можно дальше от конструктивных элементов, имеющих высокий уровень наведенной активности.

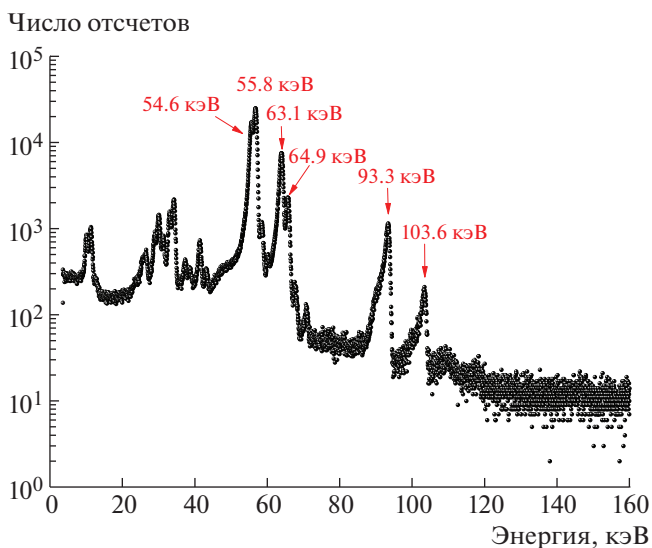


Рис. 2. Измеренный энергетический спектр радиоактивного источника ^{180}Ta детектором XR-100T-CdTe.

Измерения спектров тормозного излучения проводились с помощью полупроводникового детектора XR-100T-CdTe с зарядочувствительным предусилителем фирмы Amptek. Размеры детектора — 5×5 мм, толщина 1 мм. Для оцифровки сигнала с детектора использован модуль цифровой обработки сигнала PX5 с многоканальным анализатором и источником питания детектора той же фирмы [6].

Перед измерениями детектор откалиброван с помощью радиоактивного источника ^{180}Ta , испускающего излучение с пиковыми энергиями 54.6, 55.8, 63.1, 64.9, 93.3 и 103.5 кэВ. Энергетическое разрешение детектора составило 1.1 кэВ для энергии 103.6 кэВ (рис. 2).

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ В.Ч.-НАПРЯЖЕНИЯ НА ДУАНТАХ ЦИКЛОТРОНА У-400М

Методика измерения в.ч.-напряжения на дуантах циклотрона по спектру тормозного излучения опробована на изохронном циклотроне У-400М. Циклотрон имеет четыре ускоряющих дуанта. Диапазон частот ускоряющего напряжения У-400М: 11.5–24 МГц, расчетное значение амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах составляет 130 кВ. Измерения проводились при следующих частотах резонансной системы: 12.8, 13.317, 15.012, 15.1 и 17.5 МГц. Для калибровки измерялись спектры тормозного излучения при трех разных напряжениях на дуантах, соответствующих следующим показаниям пикап-электродов: 8.3, 9.2 и 10 В. На рис. 3 приведены спектры тормозного излучения, полученные при калибровке в.ч.-напряжения одного из дуантов при частоте 15.1 МГц.

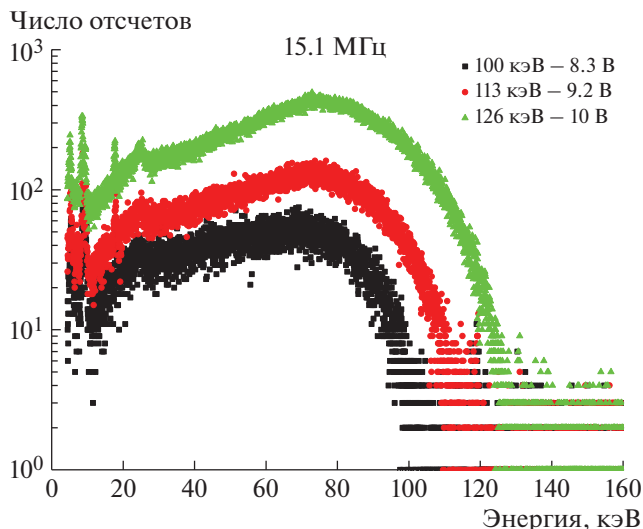


Рис. 3. Спектры тормозного излучения от дуанта циклотрона У-400М при частоте резонансной системы 15.1 МГц. Указаны значения максимальных энергий тормозного излучения, измеренные полупроводниковым детектором, и соответствующие значения напряжений на пикап-электродах.

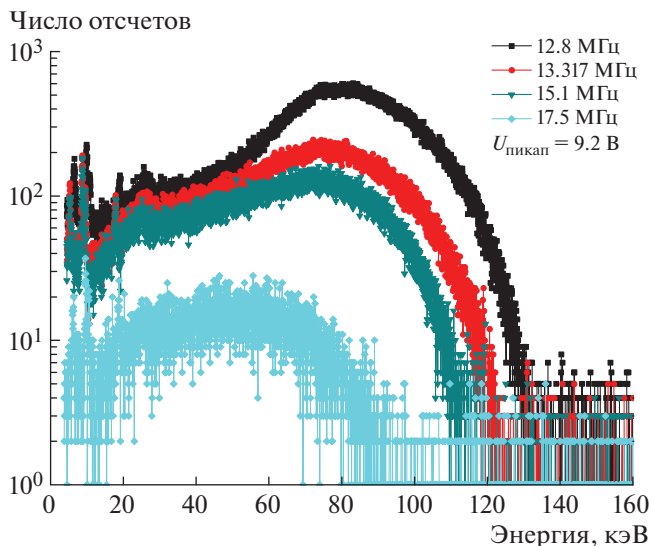


Рис. 4. Спектры тормозного излучения от дуанта циклотрона У-400М при разных частотах резонансной системы при напряжении по пикап-электроду 9.2 В.

На рис. 4 представлены результаты калибровки при разных частотах и напряжении, измеренном на пикап-электродах 9.2 В. Показано, что система контроля напряжения на дуантах с помощью пикап-электродов чувствительна к частоте резонансной системы. Например, при частотах резонансной системы 12.8 и 17.5 МГц реальные напряжения на дуантах отличаются в 1.5 раза.

По результатам измерений построены зависимости напряжений на пикап-электродах $U_{\text{пикап}}$ от максимальных энергий тормозных спектров $E_{\text{макс}}$ для разных частот (рис. 5) и получен график калибровки показаний пикап-электродов от частоты резонансной системы для циклотрона У-400М (рис. 6), где коэффициент k – отношение измеренной максимальной энергии тормозного излучения от дуантов к соответствующему значению напряжения, измеренного при калибровке с помощью электростатического вольтметра.

Точное определение максимальной энергии спектра тормозного излучения было затруднено из-за наличия радиационного фона (рис. 7) от наведенной активности на элементах циклотрона, а также из-за нестабильной работы резонансной системы при работе на высоких напряжениях, сопровождающейся пробоями напряжения.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНОГО СПЕКТРА ПРОГРАММНЫМ ПАКЕТОМ FLUKA

Для более точного определения максимальной энергии спектра тормозного излучения проведено

моделирование данного процесса с помощью программного пакета FLUKA 2011.2x.4 [7, 8], основанного на использовании метода Монте-Карло. В моделировании в качестве источника излучения рассматривался пучок электронов с энергией, соответствующей максимальному ускоряющему напряжению.

На основании проведенных расчетов с помощью программного пакета FLUKA определены максимальные энергии для всех измеренных спектров тормозного излучения. Таким образом, сравнение расчетного спектра с измеренным спектром тормозного излучения позволяет определить мак-

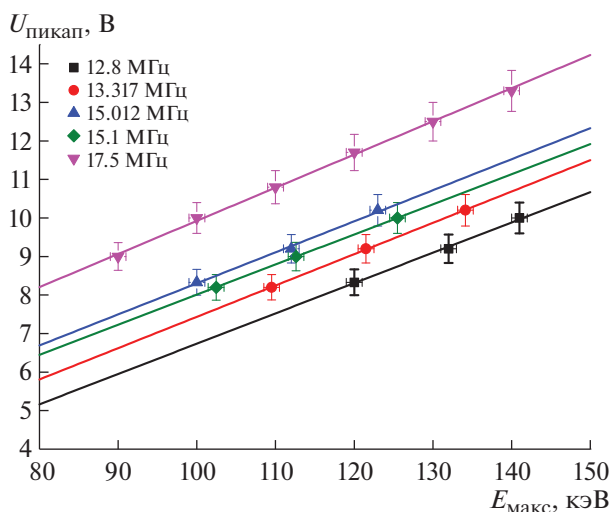


Рис. 5. Зависимость напряжений $U_{\text{пикап}}$, измеренных пикап-электродами, от максимальной энергии тормозного спектра $E_{\text{макс}}$ для разных частот.

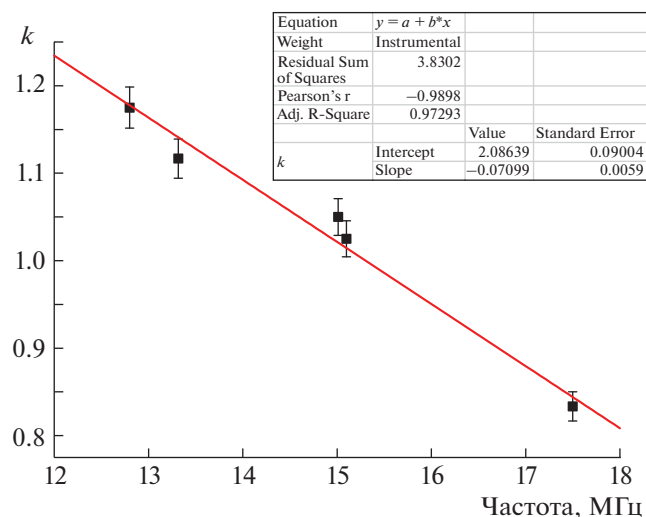


Рис. 6. График калибровки показаний пикап-электродов от частоты резонансной системы для циклотрона У-400М.

симальную энергию с точностью ± 2 кэВ. На рис. 8 представлено сравнение расчетного спектра тормозного излучения ($E_{\text{электрон}} = 140$ кэВ) с измеренным спектром.

ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ В.Ч.-НАПРЯЖЕНИЯ НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-280

Циклотрон тяжелых ионов ДЦ-280 обеспечивает получение ускоренных пучков ионов с соотношением массового числа A к заряду иона Z от 4 до 7 и массовым числом 20–238. Циклотрон имеет два ускоряющих дуанта. Энергия ускоренных пучков достигает 4–8 МэВ/нуклон, при этом интенсивность пучка > 10 мкА частиц для всех ионов с массовым числом < 50 . Диапазон частот ускоряющего напряжения варьируется от 7.32 до 10.38 МГц при амплитуде напряжения до 130 кВ [9].

Разработанная методика измерения амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов позволила отказаться от электростатического метода калибровки при пусконаладочных работах циклотрона ДЦ-280. При калибровке приборов измерения напряжения на пикап-электродах использовался метод измерения амплитуды в.ч.-напряжения по краю спектра тормозного излучения. Измерения проведены при частотах резонансной системы 8.5 и 9 МГц на каждом из дуантов, так как они являются автономными. Для этого изготовлены два окна из титановой фольги толщиной 70 мкм, расположенные на вакуумной камере циклотрона симметрично друг против друга.

Спектры тормозного излучения измерены при различных значениях напряжений на пикап-электродах. На рис. 9 приведены спектры тормозного излучения от дуанта № 2 при частоте 9 МГц.

Число отсчетов

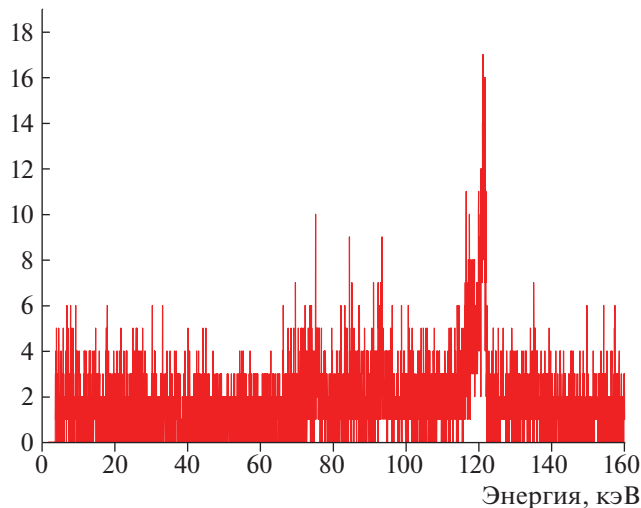


Рис. 7. Спектр радиационного фона от наведенной активности элементов циклотрона У-400М.

В процессе измерения амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах № 1 и № 2 замечены расхождения напряжений на дуантах при одинаковых показаниях по пикап-электродам, связанные, предположительно, с различными электрическими свойствами пикап-электродов. С помощью данной методики резонансная система циклотрона ДЦ-280 была настроена на режим одинаковых амплитуд в.ч.-напряжения.

Число отсчетов

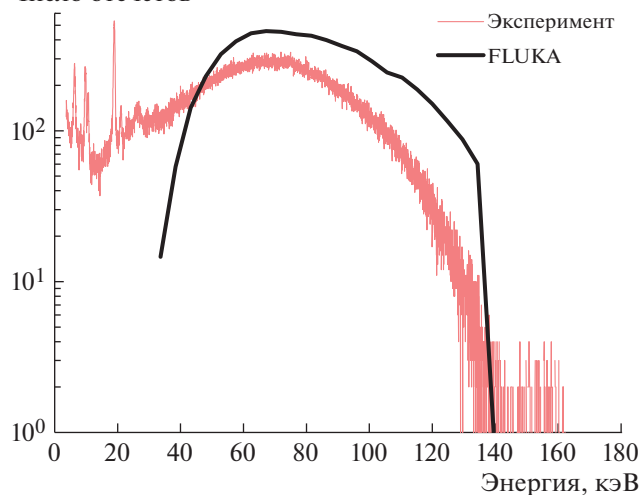


Рис. 8. Сравнение расчетного спектра тормозного излучения ($E_{\text{электрон}} = 140$ кэВ) с измеренным спектром.

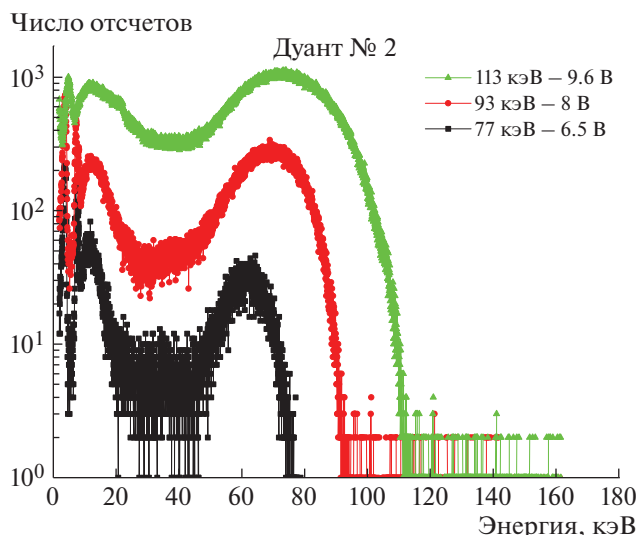


Рис. 9. Спектры тормозного излучения от дуанта № 2 при частоте резонансной системы 9 МГц. Указаны значения максимальных энергий тормозного излучения, измеренные полупроводниковым детектором, и соответствующие значения напряжений на пикап-электродах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены измерения амплитуды в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов ЛЯР ОИЯИ путем измерения спектра тормозного излучения. Измерения проводились на циклотронах У-400М и ДЦ-280.

Получен график калибровки показаний пикап-электродов от частоты резонансной системы для циклотрона У-400М. Показано, что схема измерения напряжения пикап-электродами чувствительна к частоте.

Проведено моделирование тормозного спектра с помощью программного пакета FLUKA для точного определения максимальной энергии спектра тормозного излучения. Сравнение расчетного спектра с измеренным спектром тормозного излучения позволяет определить амплитуду в.ч.-напряжения на дуантах циклотронов с точностью

± 2 кВ. Полученная точность измерений полностью отвечает поставленным требованиям. Например, допустимая абсолютная погрешность измерений амплитуды в.ч.-напряжения для циклотрона ДЦ-280 составляет не более 5%.

Разработанная методика позволила отказаться от метода калибровки высоковольтным электростатическим вольтметром. При пусконаладочных работах циклотрона ДЦ-280 оперативные измерения напряжения резонансной системы были откалиброваны с помощью данной методики, и с ее помощью проведена настройка на режим одинаковых амплитуд в.ч.-напряжения на каждом из дуантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bednarek A., Kownacki J., Sura J., Bracha T., Kalisiewicz W., Morozouicz Z., Paprzycki B., Sosnowski K.* // HIL Annual Report. 2010. p. 21.
2. *Sumit Som, Sudeshna Seth, Aditya Mandal, Saikat Paul, Anjan Dutttagupta* // Rev. Sci. Instrum. 2013. V. 84. P. 023303. <https://doi.org/10.1063/1.4789784>
3. *Duke J.P., Letchford A.P., Findlay D.J.S* arXiv:physics/0008024v3
4. *Zheng Q.W., Zhang S.H., Gao Y.H., Yu Q., Yu M.F.* // Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference. 2001. P. 601.
5. *Issatov A.T., Kabytayeva R.K., Ivanenko I.A., Kalagin I.V., Mitrofanov S.V., Teterev Yu.G.* // Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference. 2018. P. 214. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUP-SA31>
6. XR-100T-CdTe. <http://amptek.com/products/xr-100cdte/>
7. *Böhlen T.T., Cerutti F., Chin M.P.W., Fassò A., Ferrari A., Ortega P.G., Mairani A., Sala P.R., Smirnov G., Vlachoudis V.* // Nuclear Data Sheets. 2014. V. 120. P. 211. <https://doi.org/10.1016/j.nds.2014.07.049>
8. *Ferrari A., Sala P.R., Fassò A., Ranft J.* CERN-2005-10 (2005). INFN/TC_05/11. SLAC-R-773.
9. *Гульбекян Г.Г., Зарубин В.Б., Карамышева Г.А., Карамышев О.В., Франко Й.* // Письма в ЭЧАЯ. А. 2012. Т. 9. № 8. С. 89. http://www1.jinr.ru/Pepan_letters/panl_2012_8/07_gul.pdf