

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 681.5.08

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУЧКА
В КАНАЛЕ МНОГООБОРОТНОГО МИКРОТРОНА НОВОСИБИРСКОГО
ЛАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

© 2019 г. Н. А. Винокуров^{a,b,*}, Е. Н. Дементьев^{a,b,**}, С. С. Середняков^{a,b,***},
С. В. Тарарышкин^{a,b,****}, Е. И. Шубин^{a,b,*****}

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

*e-mail: N.A.Vinokurov@inp.nsk.su

**e-mail: E.N.Dementev@inp.nsk.su

***e-mail: S.S.Serednyakov@inp.nsk.su

****e-mail: S.V.Tararyshkin@inp.nsk.su

*****e-mail: E.I.Shubin@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 01.10.2018 г.

После доработки 01.10.2018 г.

Принята к публикации 10.10.2018 г.

Описана система диагностики положения электронного пучка в канале микротрона-рекуператора новосибирского лазера на свободных электронах. Положение пучка измеряется при помощи электростатических пикап-станций, установленных в разных участках вакуумной камеры по ходу движения пучка по каналу ускорителя. Особенности работы многооборотного микротрона-рекуператора привели к необходимости разработки алгоритма измерения положения пучка, отличного от алгоритмов, применяемых на других ускорителях заряженных частиц. С помощью этой системы можно отдельно измерять положение как ускоряемых, так и замедляемых пучков, одновременно присутствующих на некоторых участках микротрона-рекуператора.

DOI: 10.1134/S003281621903011X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Новосибирске на базе 4-оборотного микротрона-рекуператора работает лазер на свободных электронах (л.с.э.) [1]. Весь комплекс может работать в трех режимах, различающихся по энергии используемого электронного пучка, диапазону длин волн излучения и его мощности. По сути, каждый режим работы представляет собой отдельный л.с.э. со своим ондулятором и оптическим резонатором. Полная схема комплекса приведена на рис. 1.

Для обеспечения стабильной работы л.с.э. в течение длительного времени необходимы различные системы диагностики состояния л.с.э. и параметров электронного пучка, в число которых входит и система диагностики положения пучка в канале ускорителя. Эта система служит для измерения и отображения поперечного положения электронного пучка в местах расположения пикап-станций, которые установлены на всем пути следования пучка от инжектора до поглотителя.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И ПРИНЦИП РАБОТЫ Л.С.Э.

Как было сказано выше, л.с.э. работает на базе 4-оборотного микротрона-рекуператора. Принцип работы данного ускорителя таков, что электронный пучок, двигаясь по круговой траектории, пролетает несколько раз одну и ту же ускоряющую структуру. Его конечная энергия при этом зависит от числа пролетов этой структуры.

После пролета нужного числа дорожек и прохода конечной дорожки (на которой и расположен л.с.э.) электронный пучок начинает пролетать ту же ускоряющую структуру, но в отрицательной (тормозящей) фазе высокочастотных колебаний и тем самым теряет энергию. Пролетев ускоряющую секцию такое же число раз, электронный пучок отдает обратно всю энергию, полученную при ускорении, и попадает на поглотитель с энергией инжекции.

Три режима работы (очереди) л.с.э. соответствуют разному числу оборотов электронного

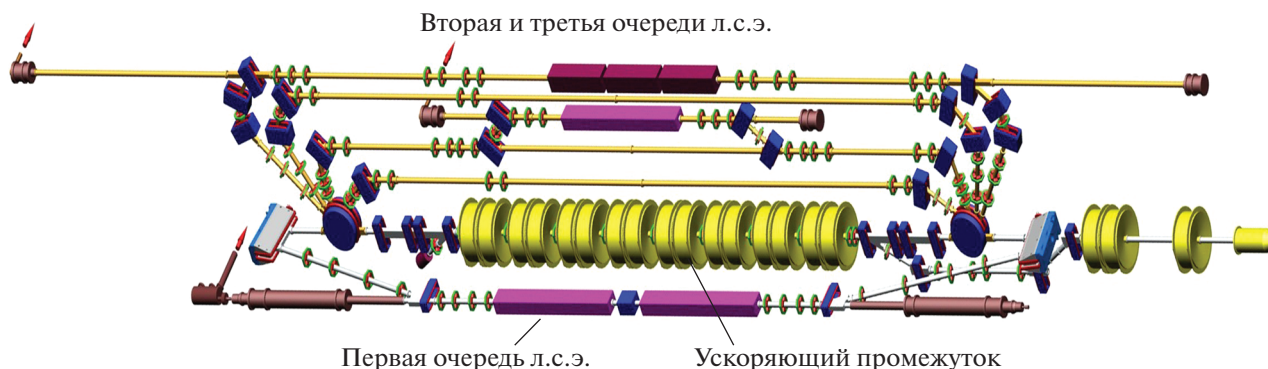


Рис. 1. Схема новосибирского лазера на свободных электронах.

пучка в канале ускорителя и соответственно разной его энергии. На каждой дорожке, соответствующей последнему обороту данной очереди, установлен свой оптический резонатор и ондулятор, в которых происходит генерация и накопление когерентного излучения.

Описанная выше структура ускорителя и режим циркуляции пучка приводят к тому, что на некоторых участках канала присутствуют одновременно пучки с разными энергиями. Так, на всех оборотах ускорителя, кроме последнего для данной очереди, попеременно двигаются ускоряемый и замедляемый пучки. В ускоряющей же секции попеременно следует несколько ускоряемых пучков (для каждой дорожки) и столько же замедляемых. Все эти пучки имеют разную энергию, двигаются по своей траектории и соответственно могут иметь различные поперечные координаты в канале ускорителя. Таким образом, система диагностики пучка для данного комплекса должна уметь разделять положения этих разных электронных пучков.

Учитывая особенности работы и предъявляемые требования, разрабатываемая система имеет существенные отличия от аналогичных систем, используемых на других ускорительных комплексах [2]. В частности, это определило выбор измерительной аппаратуры и алгоритм измерений.

ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ

Как было упомянуто выше, система измерения положения пучка состоит из пикап-станций [3], установленных на различных участках вакуумной камеры. Пикап-станция представляет собой 4 изогнутые прямоугольные пластины, установленные по внутренней поверхности вакуумной камеры (рис. 2). Пластины образуют окружность диаметром около 80 мм. Сигнал с каждой пластины выводится при помощи экранированных кабелей за пределы ускорительного зала к месту расположения измерительной электроники.

Электронный пучок, пролетая через пикап-электроды, наводит на них импульс напряжения. Амплитуда наводимого импульса пропорциональна расстоянию от пучка до пластины. Сравнивая амплитуды сигналов с разных пластин, можно вычислить поперечную координату пучка с помощью формулы:

$$x = k \frac{U_{1\max} - U_{3\max}}{U_{1\max} + U_{3\max}},$$

где k — коэффициент пропорциональности (в случае круглой трубы $k \cong a/4$, где a — радиус трубы); $U_{1\max}$, $U_{3\max}$ — амплитуды импульсов с пластин, расположенных друг напротив друга в плоскости измеряемой координаты.

Мимо некоторых пикап-станций попеременно двигаются электронные пучки, прошедшие ускоряющую секцию разное число раз и, следовательно, имеющие разную энергию. Поэтому с помощью измерительной электроники и алгоритма измерения нужно уметь разделять импульсы с пластин, соответствующие этим “разным” электронным пучкам.

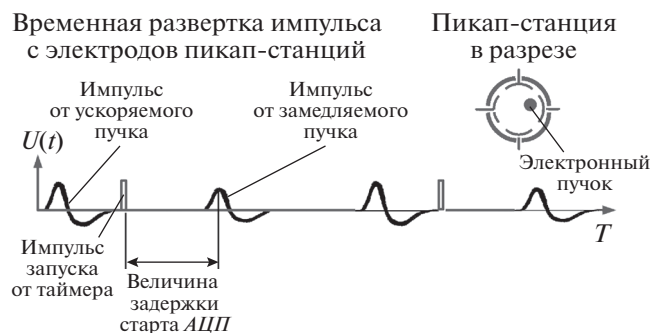


Рис. 2. Временная развертка сигнала с пикап-пластин.

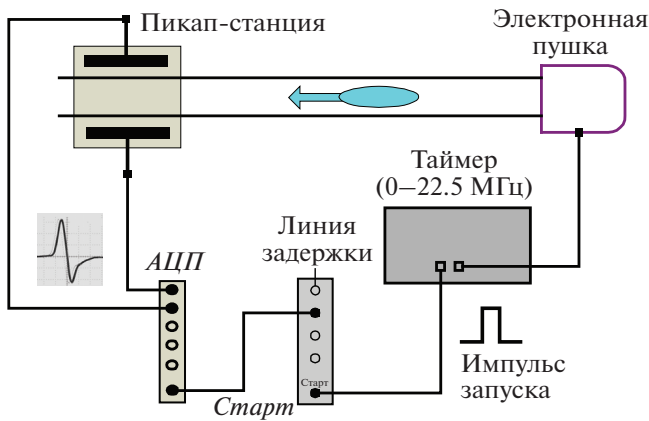


Рис. 3. Схема синхронизации измерений.

АЛГОРИТМ ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМАЯ АППАРАТУРА

Положение пучка измеряется с помощью электроники, расположенной вне ускорительного зала [4]. Синхронизационная схема алгоритма приведена на рис. 3.

Измерение проводится при помощи 4-канального аналого-цифрового преобразователя АЦП по импульсу внешнего запуска. На каждый канал АЦП подается сигнал с одной из пластин пикап-

станции. Импульсы запуска поступают от таймера, который управляет модулятором электронной пушки. Поэтому частота импульсов, поступающих на вход “Старт” АЦП равна частоте следования электронных ступков в канале ускорителя и соответственно частоте импульсов, поступающих с пикап-электродов на входы АЦП. Для компенсации времен, необходимых для распространения пучка от инжектора до нужной пикап-станции импульс запуска для АЦП пропускается через регулируемую линию задержки (см. рис. 3). Данная особенность и позволяет отдельно измерять импульсы от разных электронных пучков, задавая разные времена задержки (см. рис. 2). Кроме того, изменение задержки позволяет настроиться на любую фазу измеряемого импульса. Более того, плавно перестраивая величину задержки, можно просканировать весь импульс с пикап-пластины и восстановить его приблизительную форму.

Схема всей системы и используемая аппаратура показаны на рис. 4. Вся система содержит 62 пикап-станции.

Вся измерительная электроника выполнена в стандарте КАМАК (см. рис. 4). Как видно из схемы, для уменьшения количества измерительных устройств (АЦП) все пикап-станции сгруппированы по пять штук и вся пятерка подключена к

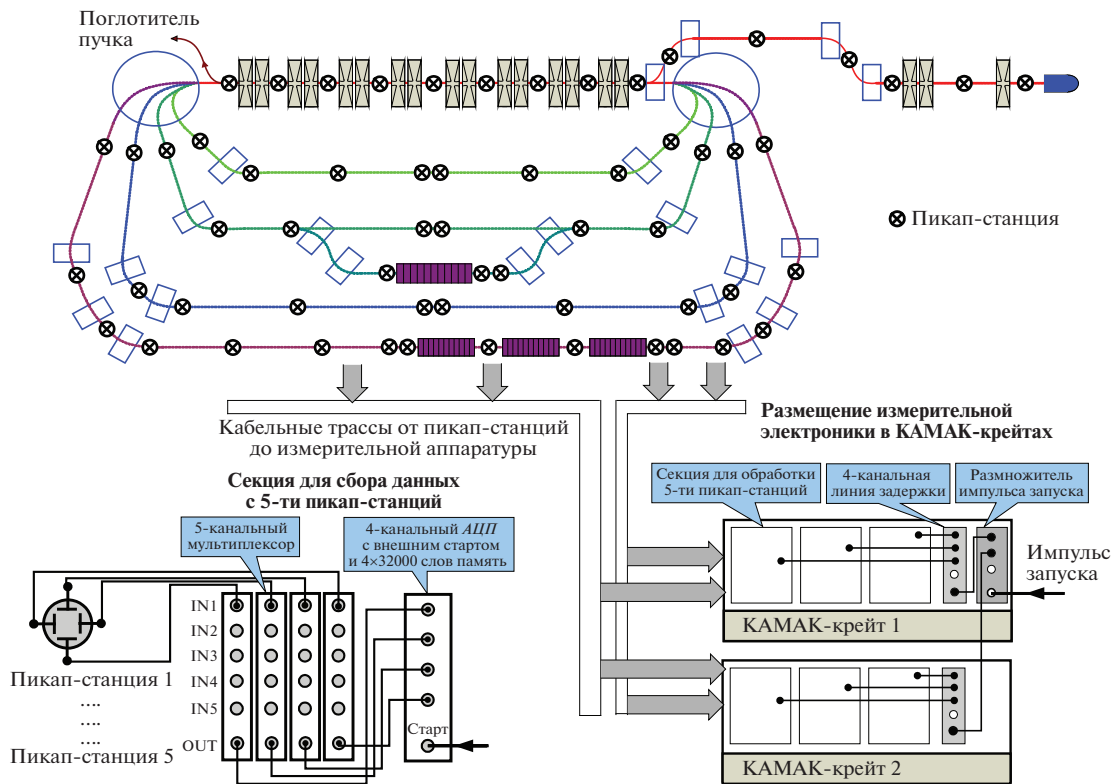


Рис. 4. Полная схема системы.

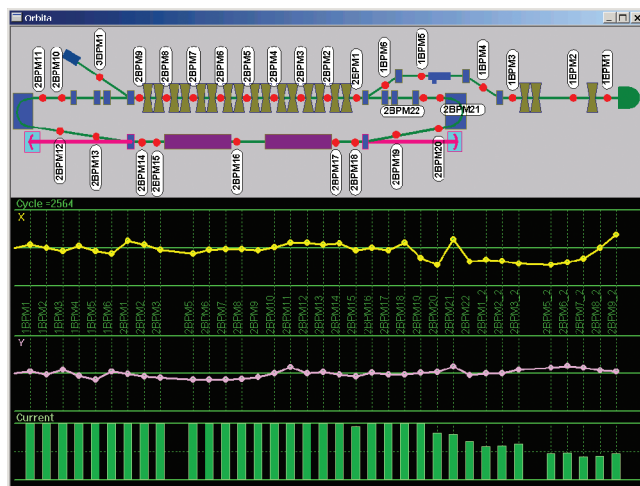


Рис. 5. Траектория пучка в канале ускорителя, полученная после опроса всех пикап-станций.

одному АЦП при помощи КАМАК-модулей — 5-канальных мультиплексоров. В результате, каждую пятерку пикап-станций обслуживает секция из четырех мультиплексоров и одного АЦП (см. рис. 4). Всего в одном КАМАК-крейте может располагаться до трех таких секций.

Для обеспечения задержки запуска измерения АЦП используется еще один КАМАК-модуль — 4-канальная управляемая линия задержки. Данный модуль принимает на вход импульс запуска от таймера и выдает его на все 4 выхода задержанным на требуемое время, записанное при помощи КАМАК-команды. Таким образом, данный модуль может управлять запуском до четырех АЦП. В каждом КАМАК-крейте устанавливается отдельный такой модуль, который и синхронизирует работу всех трех секций в этом крейте (см. рис. 4). Вся измерительная электроника располагается в пяти КАМАК-крейтах.

РАБОТА И ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМЫ

Управление процессом измерения положения пучка и последовательный опрос всех пикап-станций осуществляются при помощи управляющей программы, которая работает на персональном компьютере типа IBM-PC. КАМАК-крейты подключены при помощи специализированных линий связи и интерфейсной платы, устанавливаемой в управляющий компьютер. Управляющая программа может работать в трех режимах:

1) последовательный опрос всех пикап-станций по очереди для получения и отображения траектории следования пучка в канале ускорителя;

2) получение временной развертки сигнала с отдельной пикап-станции путем перестройки величины задержки запуска АЦП в достаточно широких пределах;

3) быстрые измерения сигнала с выделенной пикап-станции с фиксированным временем задержки и с частотой следования электронных сгустков; измерения сохраняются в память АЦП.

Ниже следует более подробное описание каждого режима работы.

Последовательный опрос всех пикап-станций

В этом режиме управляющая программа опрашивает по очереди все пикап-станции по ходу движения пучка. При опросе каждой пикап-станции задаются свои, предварительно сохраненные величины задержек запуска АЦП, соответствующие максимуму импульса с пикап-пластин, наведенного интересующим электронным пучком. Для повышения точности и устранения временных погрешностей программа проводит измерения не в одной точке, а перебирает небольшой диапазон, составляющий 6—10 шагов по времени задержки вблизи максимума импульса. В результате каждого цикла опроса программа выводит на экран траекторию пучка по всему ходу его движения (см. рис. 5).

Быстродействие аппаратуры таково, что для снятия положения пучка при одном заданном времени задержки требуется чуть меньше 1 мс. Полное же время опроса всех пикап-станций составляет около 500 мс для первой очереди л.с.э. и 1500 мс для 3-й очереди.

Получение временной развертки сигнала с отдельной пикап-станции

В этом режиме программа выполняет опрос одной пикап-станции. Далее программа организует цикл по времени задержки запуска в достаточно широких пределах и выводит полученные данные на экран в виде графика. В результате на экране пользователь получает временную развертку импульсов со всех четырех пикап-электродов данной пикап-станции (рис. 6). Если диапазон опроса сделать достаточно большим, то для тех пикап-станций, где присутствуют разные пучки (ускоряемый и замедляемый), на полученном графике можно увидеть импульсы от этих разных пучков (см. верхний график на рис. 6).

Помимо этого, данная функция может работать в циклическом режиме и в режиме накопления графиков (см. нижний график на рис. 6). В этом случае колебания положения пучка хорошо будут видны на графике в виде “замазывания” и утолщения соответствующих кривых.

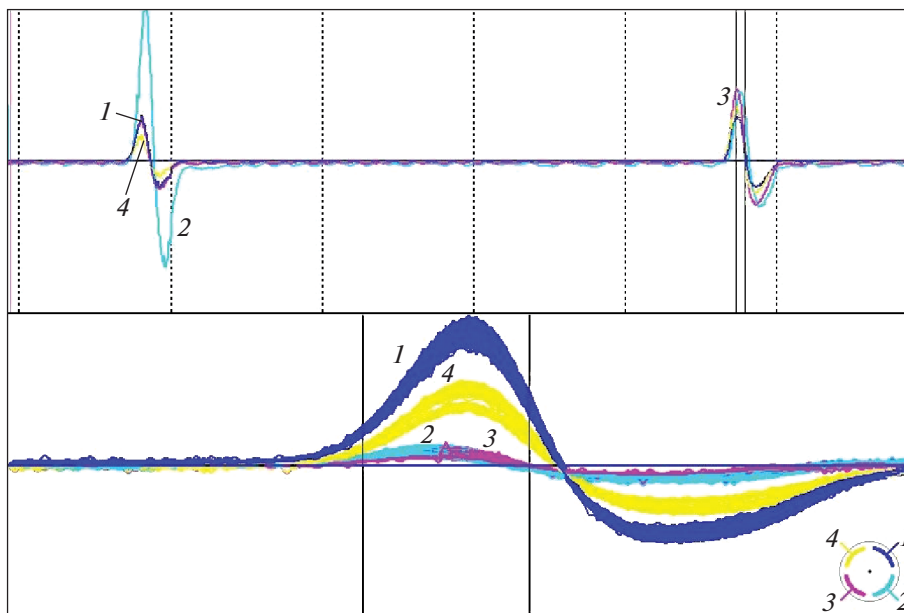


Рис. 6. Измеренная временная развертка сигнала с пикап-электродов (см. схему в правом нижнем углу, номера кривых соответствуют номерам пикап-электродов).

Таким образом, основные применения данного режима работы следующие:

- контроль правильности функционирования всей системы по наличию и поведению полученных осциллограмм;
- установление пределов времен задержки для последующего использования их в первом, основном, режиме;
- визуальное наблюдение формы импульсов для определения возможных колебаний положения или тока пучка на данной пикап-станции.

Быстрые измерения амплитуды сигналов с частотой следования электронных сгустков

В предыдущих двух режимах измерения проводятся в разные моменты времени, между которыми успевает пролететь произвольное количество электронных сгустков. Таким образом, полученные данные (измеренное положение пучка, временная развертка импульса) набираются из измерений по разным сгусткам, и поэтому являются усредненными по этой случайной выборке.

Третий режим работы отличается тем, что в нем измерения проводятся с частотой следования пучков и без каких-либо случайных временных

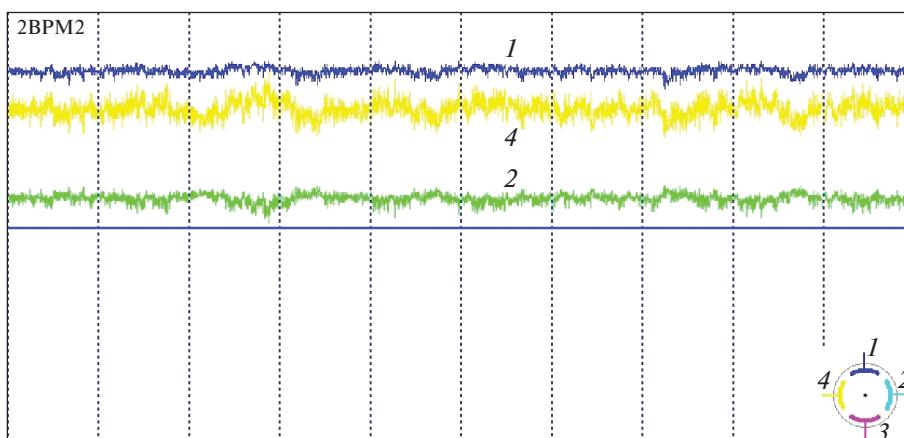


Рис. 7. График измерений, проведенных с частотой следования пучка. Графики соответствуют амплитудам сигналов с разных электродов пикап-станции (см. схему в правом нижнем углу, номера кривых соответствуют номерам пикап-электродов).

задержек либо пропусков пучков. При переходе на этот режим программа переключается на выбранную пикап-станцию, задает постоянную величину задержки и запускает цикл измерений во внутреннюю память АЦП по внешнему запуску. Как было сказано выше, частота внешних запусков равна частоте следования электронных сгустков, поэтому в результате в памяти АЦП будут сохраняться измеренные в определенной фазе амплитуды импульсов от сгустков, следующих один за другим. Далее, выведя на экран массив оцифрованных результатов измерений, получим зависимость амплитуды импульсов с пикап-пластин от номера сгустка (либо от времени) (рис. 7).

Если имеют место какие-либо колебания положения или тока пучка, они будут видны на экране как колебания сигналов с соответствующих пластин. Зная число выполненных измерений и частоту следования сгустков, легко восстановить временную шкалу и частоты колебаний и пульсаций положения пучка, если они имеют место.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Система мониторинга положения пучка работает на протяжении ряда лет. Успешная эксплуа-

тация л.с.э., всех его трех очередей подтверждает правильность выбора измерительной аппаратуры и алгоритма измерений. Разработанная система имеет достаточные точность измерения и быстродействие. Примененный принцип измерений позволяет отдельно определять положения разных электронных сгустков, пролетающих мимо одной пикап-станции, а также детектировать возможные колебания положения и тока пучка и определять их амплитуду и частоту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shevchenko O.A., Arbuzov V.S., Vinokurov N.A., Vobly P.D., Volkov V.N., Getmanov Ya.V., Gorbachev Ya.I., Davidyuk I.V., Dementiev E.N., Dovzhenko B.A., Knyazev B.A., Kolobanov E.I., Kondakov A.A., Kozak V.R., Kozyrev E.V. et al.* // Physics Procedia. 2016. Т. 84. С. 13–18.
2. *Бехтенов Е.А., Карнов Г.В., Пиминов П.А.* // ПТЭ. 2017. № 5. С. 74. doi 10.7868/S0032816217050044
3. *Schmickler H.* // Proc. of IBIC2015. Melbourne, Australia, 2015. THALA01. P. 618. ISBN 978-3-95450-176-2
4. *Дементьев Е.Н., Шубин Е.И.* // Атомная энергия. 2002. Т. 93. Вып. 6. С. 453.