

## РАЗРАБОТКА, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЙ

*В.Л. Чахлов, А.Г. Бронников, В.Г. Волков, Ю.Н. Зеленов, А.А. Звонцов  
Ю.Д. Зрелов, В.А. Касьянов, В.С. Пушкин, А.А. Филимонов, М.М. Штейн  
А.М. Филиппов, А.С. Сафронов, А.П. Носенко, М.М. Рычков, Е.Ф. Токач  
С.А. Демченко, Е.П. Шумный, В.В. Романов*

В статье представлены основные особенности разработки, организации производства и применения малогабаритных источников рентгеновского и электронного излучений.

Во многих областях человеческой деятельности находят применение источники ионизирующего излучения с энергией частиц, лежащей в диапазоне от нескольких десятков кэВ до 10 МэВ.

В качестве источников излучения в указанном энергетическом диапазоне в настоящее время используются рентгеновские аппараты, радиоактивные изотопы и различные типы ускорителей – бетатроны, микротроны и линейные ускорители.

Основными областями применения малогабаритных источников излучения являются:

- неразрушающий контроль материалов и изделий, как в промышленности, так и строительстве;
- досмотр ручной клади, содержимого контейнеров и крупногабаритных транспортных средств;
- использование спецслужбами для решения своих задач;
- радиационные испытания радиоэлектронной аппаратуры с целью прогнозирования сроков ее службы в условиях космического пространства;
- радиационная терапия быстрыми электронами широкого класса заболеваний онкологического и иного характера.

НИОКР велись по двум типам источников излучения: малогабаритным бетатронам, нигде в мире больше не производимым, и частотно-импульсным рентгеновским аппаратам с оригинальной схемой получения высокого напряжения. В подавляющем большинстве эти работы велись по техническим заданиям войсковых частей и предприятий военно-промышленного комплекса (ВПК) и финансировались ими.

Бетатрон – индукционный циклический ускоритель электронов, в котором энергия частиц увеличивается вихревым электрическим полем, создаваемым изменяющимся магнитным потоком, проходящим внутри орбиты частиц.

В 60–70-х годах 20-го столетия бетатроны на энергии 15–45 МэВ выпускались во многих странах мира. В дальнейшем они были вытесненными линейными ускорителями. Лишь одна разновидность этих ускорителей, имеющих энергию до 10 МэВ, и, вследствие этого, малые размеры и вес, оказалась востребованной. Это случилось во многом потому, что для их совершенствования был выполнен большой объем научных и опытно-конструкторских работ, в первую очередь сотрудниками лабораторий № 41, 42, 43 НИИ интроскопии.

Малогабаритные бетатроны как источники излучения для радиационной дефектоскопии обладают рядом преимуществ по сравнению с другими типами ускорителей и радионуклидными источниками. Они имеют достаточно большую энергию излучения, малый размер фокусного пятна, возможность регулирования максимальной энергии, непрерывный спектр тормозного излучения. Эти преимущества позволяют одной установкой осуществлять контроль материалов или изделий с широким диапазоном

толщин. Кроме того, проблемы радиационной безопасности для малогабаритных бетатронов решаются существенно проще, чем для радионуклидных источников.

Но классический бетатрон в соответствии с используемым в нем принципом ускорения не позволяет ускорять в одном цикле большое количество электронов и, следовательно, дает меньшую мощность дозы излучения по сравнению с другими ускорителями. Поэтому усилия разработчиков малогабаритных бетатронов были направлены, в первую очередь, на повышение мощности дозы. Мощность дозы в последних моделях малогабаритных бетатронов увеличена в 15–20 раз по сравнению с первыми образцами при одних и тех же размерах и массе. Высокие характеристики излучения, простота и эксплуатационная надежность, а также радиационная безопасность в выключенном состоянии обеспечивают малогабаритным бетатронам устойчивый спрос на отечественном и зарубежном рынках.

Расширению экспортных поставок способствовала сертификация производства малогабаритных бетатронов по стандарту качества ИСО.

Накопленный опыт позволяет быстро и качественно разрабатывать новые модели бетатронов с максимальным учетом требований конкретного заказчика. Так, в связи с возрастающей угрозой терроризма в последние годы увеличился спрос на технические средства контроля багажа и крупногабаритных грузов (досмотровые системы). Авторы работы создали для досмотровых систем несколько типов источников тормозного излучения на основе бетатрона, обладающих рядом преимуществ по сравнению с рентгеновскими, изотопными и источниками излучения на основе линейных ускорителей.

В настоящее время малогабаритные бетатроны, разработанные в НИИ интроскопии, можно разделить по назначению на следующие группы:

1. Малогабаритные бетатроны, предназначенные для неразрушающего радиационного контроля материалов и изделий. Большинство бетатронов этой группы можно использовать в нестационарных условиях.
2. Малогабаритные бетатроны, предназначенные для досмотровых систем, в том числе и таможенного контроля крупногабаритных контейнеров, изделий и багажа.
3. Специальные типы малогабаритных бетатронов.
4. Малогабаритные бетатроны с выведенным электронным пучком.

В малогабаритных бетатронах используются ускорительные камеры, аналогичные обычным радиолампам, которые не требуют в процессе эксплуатации наличия каких-либо вакуумных насосов, что характерно для других типов ускорителей.

В результате совместных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, выполненных НИИ интроскопии и ЗАО «Светлана-Рентген» (г. Санкт-Петербург) были созданы ускорительные камеры на энергию от 2,5 до 10 МэВ. Наличие необходимого технологического оборудования на ЗАО «Светлана-Рентген», основной продукцией которого являются рентгеновские трубки, позволили организовать серийный выпуск ускорительных камер в необходимых количествах.

Использование технических решений, применяемых в малогабаритных бетатронах, дало возможность создать серию частотно-импульсных рентгеновских аппаратов на максимальные напряжения от 90 до 300 кВ.

Первоначально разработка частотно-импульсных аппаратов велась в соответствии с технико-техническими требованиями, сформулированными в в/ч 43753-В. Она же разработала методики их применения для решения специальных задач, укомплектовав свои подразделения большим количеством аппаратов. В настоящее время в/ч 43753-В остается основным потребителем рентгеновских аппаратов на различные напряжения.

Таким образом, при едином схемном и конструктивно-технологическом подходе был перекрыт широкий энергетический диапазон от десятков кэВ до 10 МэВ.

Целенаправленные исследования, выполненные в НИИ интроскопии, можно с полным основанием отнести к наукоемкой технологии. Они дали возможность соз-

дать и организовать производство уникальных приборов, не имеющих аналогов в нашей стране и за рубежом и никем больше не производимых.

Последнее объясняется тем, что затраты на освоение этой продукции и накопление необходимого «ноу-хау» у потенциальных конкурентов будут очень велики.

Конечный выпуск малогабаритных бетатронов и рентгеновских аппаратов, а также все НИОКР сосредоточены в лабораториях 41 и 43 НИИ интроскопии ГОУ ВПО ТПУ и созданном при нем малом предприятии ООО «Фотон».

В этих подразделениях ведется конечная сборка, монтаж и настройка источников излучения. Для этого были разработаны и изготовлены все необходимые контрольно-испытательные стенды, а также соответствующее технологическое оборудование.

Механические работы выполняются частично в опытном производстве НИИ интроскопии, частично по договорам на заводах г. Томска. На этих же заводах выполняются технологические операции, требующие нестандартного оборудования такие, как литье заготовок, гальваническое покрытие деталей и пропитка моточных изделий, покраска, нанесение надписей и т. д.

На всех этапах производства большое внимание уделяется качеству работы. Выпуск наиболее массового изделия – источника излучения «ВЕАМ» для досмотровых систем сертифицирован по стандарту ИСО 9001.

Производство других изделий, хотя формально и не сертифицировано, осуществляется с полным учетом требований этого стандарта.

Отсутствие прямых аналогов в мире для большинства типов выпускаемых источников излучения, их широкая номенклатура и высокие технические характеристики, приемлемая для таких сложных изделий надежность обеспечивает разработанным и выпускаемым источникам постоянно растущий спрос.

Суммарный объем реализации всех типов источников, включая выполненные заказные НИОКР по ним, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Год	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Объем продаж, млн руб	8,14	11,55	24,94	34,15	46,26	48,12	37,51	52,13	87,82

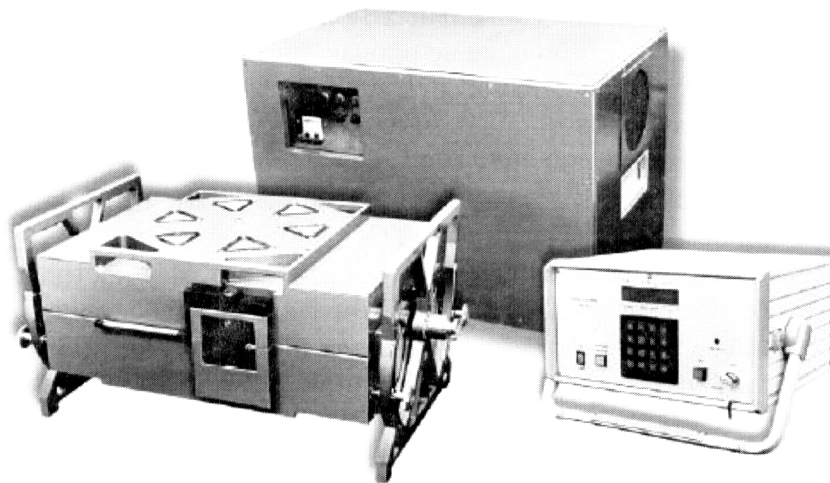
Данные таблицы показывает, что за 9 последних лет годовой объем продаж вырос более чем в 10 раз. Общий объем поступлений за эти годы составил 350,62 млн рублей, причем примерно 70 % средств получено за счет поставок на экспорт.

Для расширения рынка сбыта сотрудники НИИ интроскопии осуществляли обучение основам сервисного обслуживания бетатронов специалистов стран Англии, Германии, Китая, Италии.

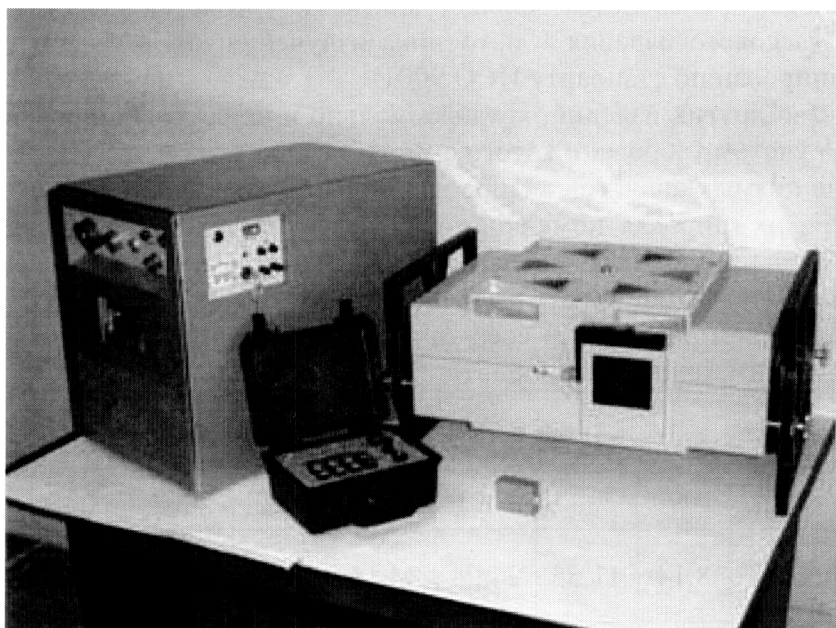
На рис. 1–14 представлены внешний вид различных типов бетатронов и рентгеновских аппаратов.

Источники излучения – бетатроны и рентгеновские аппараты – это достаточно сложные изделия, при разработке которых использовались современные знания физики процессов ускорения элементарных частиц, электротехники, электроники и вакуумной техники.

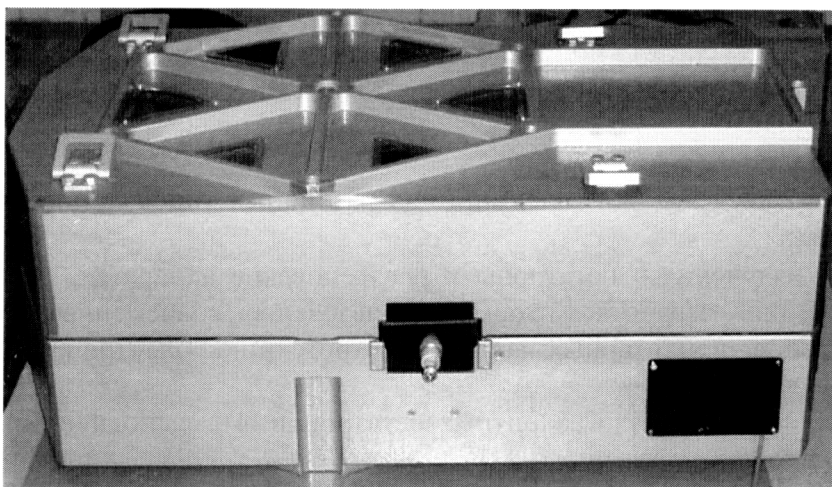
В процессе создания малогабаритных бетатронов был выполнен большой объем научных исследований и опытно–конструкторских работ, направленных на увеличение энергии ускоренных электронов и мощности дозы излучения при жестких ограничениях, предъявляемых к габаритам и массе установок.



*Рис. 1. Малогабаритный бетатрон РХВ-6*

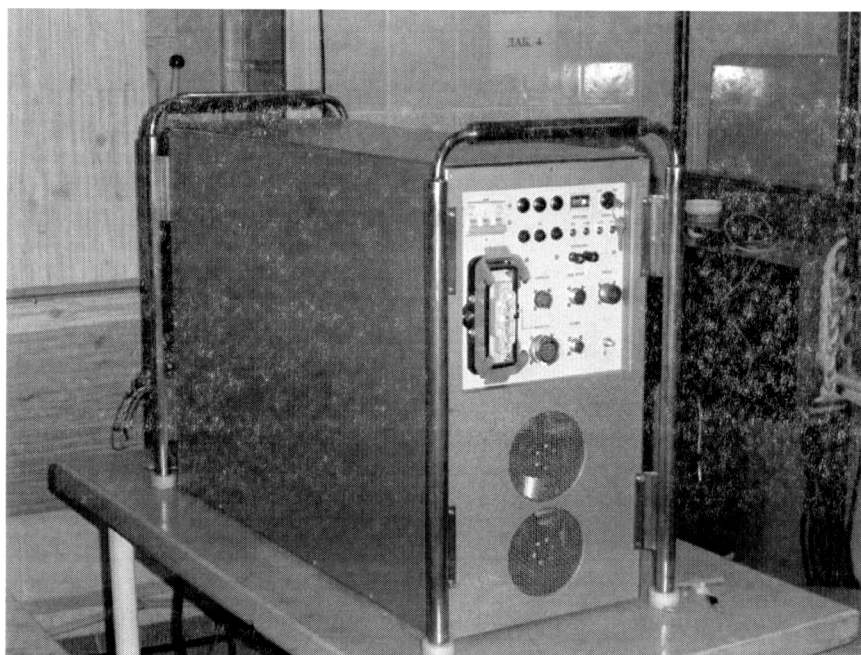


*Рис. 2. Внешний вид бетатрона МИБ-7.5*

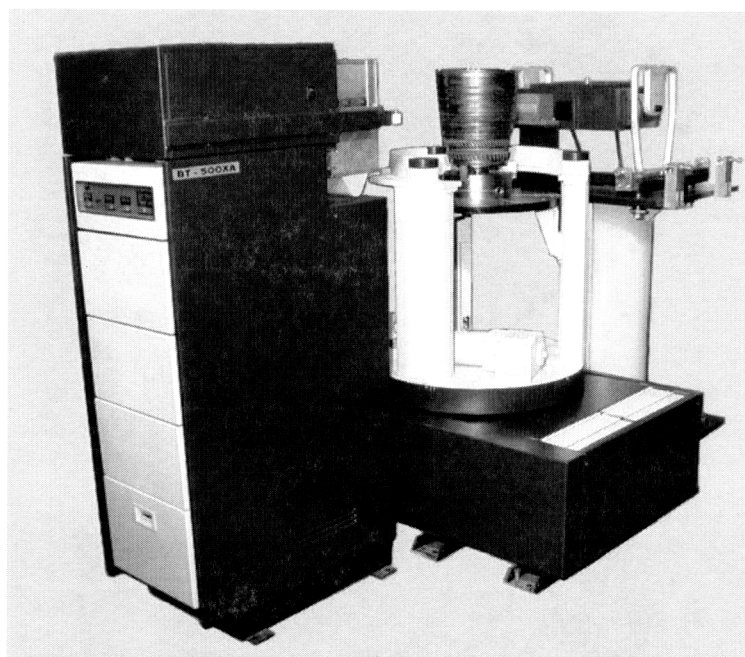


*Рис. 3. Внешний вид излучателя бетатрона «КРАБ»*

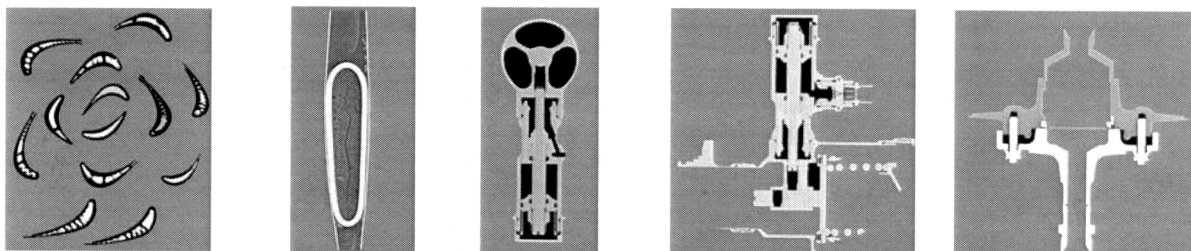




*Рис. 4. Блок питания бетатрона «КРАБ»*



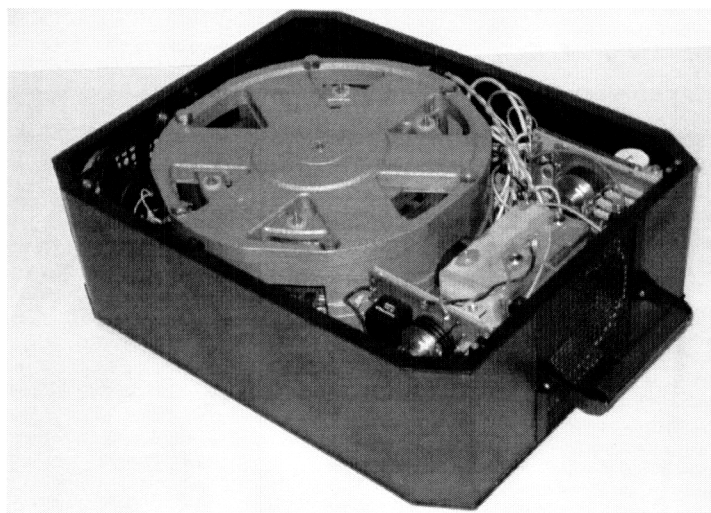
*Рис. 5. Промышленный компьютерный томограф BT-500XA с малогабаритным бетатроном МИБ-5*



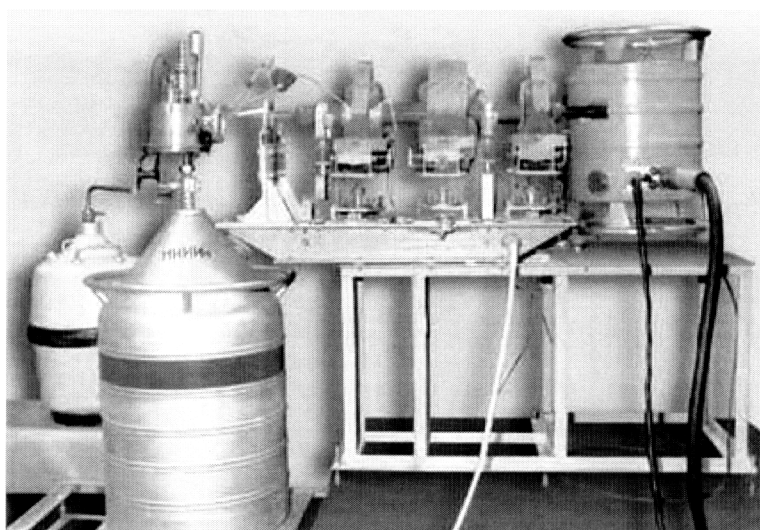
*Рис. 6. Групповая томограмма 13 охлаждаемых турбинных лопаток, томограммы лопасти вертолета и ракетных клапанов*



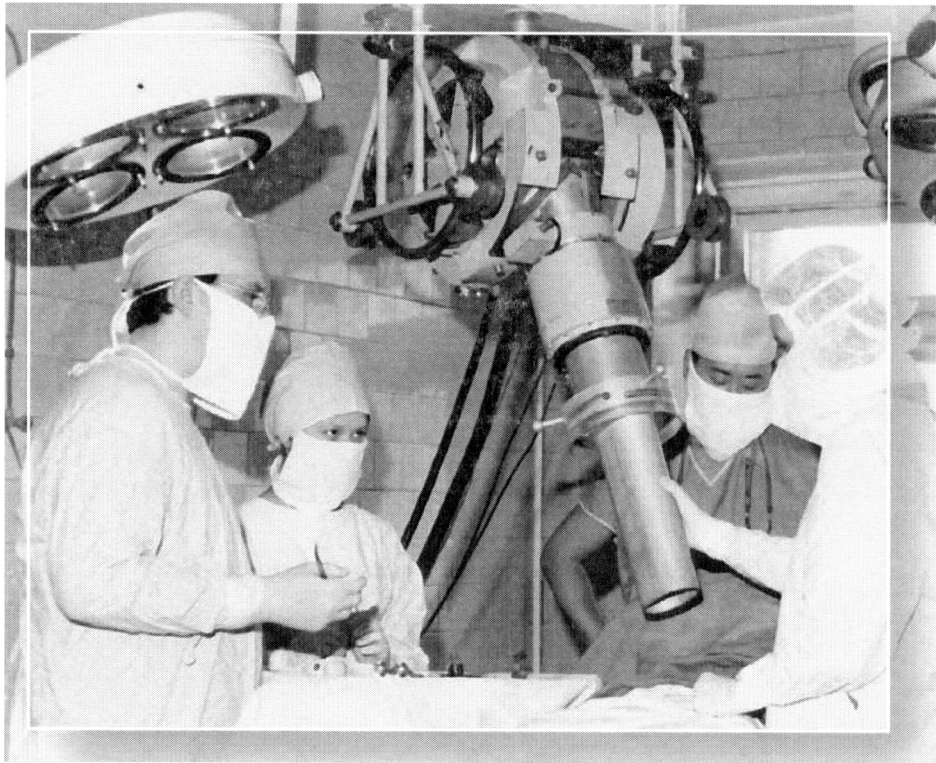
*Рис. 7. Внешний вид излучателя бетатрона «BEAM»*



*Рис. 8. Излучатель бетатрона PXB-2.5*



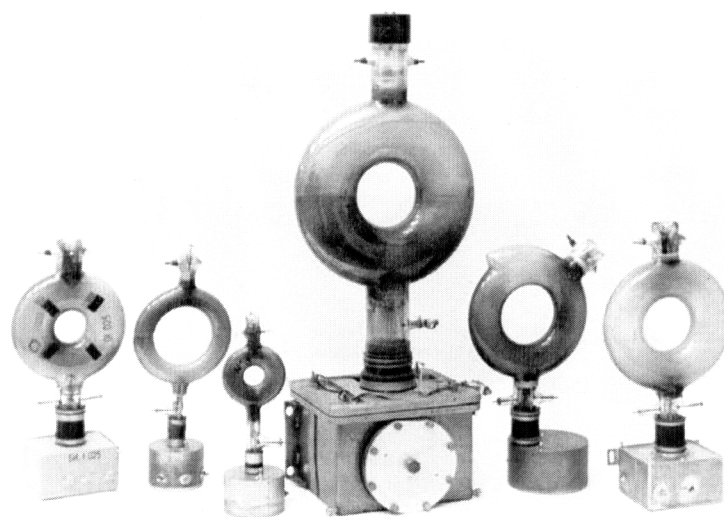
*Рис. 9. Внешний вид установки для радиационных испытаний материалов*



*Рис. 10. Интраоперационная терапия*



*Рис. 11. Медицинский бетатрон БМ-10Э*



*Рис. 12. Отпаянные ускорительные камеры*



*Рис. 13. Рентгеновский аппарат РАП 160-5*



*Рис. 14. Серия излучателей на различные максимальные напряжения*



Эти работы осуществлялись по следующим направлениям:

- исследование способов формирования магнитных полей и разработка электромагнитов, обеспечивающих при минимальных размерах и массе ускорение большого количества электронов до заданной энергии;
- изучение процесса ускорения электронов в малогабаритных бетатронах и выбор оптимальных режимов для каждого из этапов этого процесса: инъекции, захвата частиц в режим ускорения, смещения ускоренных частиц на мишень или вывода их за пределы излучателя;
- анализ электромагнитных процессов и разработка компактных импульсных источников питания электромагнитов бетатронов;
- применение новых электронных компонентов, в том числе и микропроцессорной техники, для контроля и управления ускорителем и выходными параметрами излучения.

Накопленный опыт при создании бетатронов и, в частности, высоковольтных систем инъекции позволил предложить и реализовать еще один тип источников излучения – частотно-импульсные рентгеновские аппараты.

В научном плане была предложена оригинальная схема питания высоковольтного трансформатора, формирующая импульсы, близкие к прямоугольным, что увеличивает выход рентгеновского излучения. Применительно к этой схеме была разработана методика расчета импульсного трансформатора, обеспечивающая при заданных искажениях импульса минимум его веса.

На основе этих исследований была разработана серия частотно-импульсных аппаратов различного назначения с максимальными напряжениями от 90 до 300 кВ. Созданы две модели аппаратов на 160 и 300 кВ с дуальной энергией, не имеющие аналогов ни в России, ни за рубежом.

По результатам этих исследований защищено две докторских диссертации, 28 кандидатских диссертаций. По тематике данной работы получено 59 авторских свидетельств, 16 зарубежных патентов, опубликовано около 200 научных статей и докладов на международных и российских конференциях.

Малогабаритные бетатроны и частотно-импульсные рентгеновские аппараты нашли широкое применение в войсковых частях, предприятиях ВПК, а также в промышленности для радиационного контроля материалов и изделий различной толщины, как в цеховых, так и в нестационарных условиях. Впервые малогабаритные бетатроны применены в мобильных системах контроля (досмотра) крупногабаритных контейнеров, грузов и изделий. Последние модели малогабаритных бетатронов и частотно-импульсных рентгеновских аппаратов могут генерировать тормозное излучение в двух и более энергетических диапазонах. Это обстоятельство позволяет определять элементный состав контролируемого объекта, на пример обнаруживать наличие взрывчатых веществ и наркотиков.

Бетатроны с выведенным электронным пучком используются для исследования воздействия радиационного излучения на различные материалы и приборы. Опыт применения малогабаритных бетатронов для лучевой терапии злокачественных новообразований и в интраоперационной терапии, при которой бетатрон располагается непосредственно в операционной, показал высокую эффективность и перспективность использования этих установок в медицине.

В Томском политехническом университете малогабаритные источники излучения используются в учебном процессе.

В настоящее время малогабаритные бетатроны и рентгеновские аппараты выпускаются в НИИ интроскопии ГОУ ВПО ТПУ, который имеет лицензии на разработку, исследование и их производство.



Для обеспечения качества поставляемых малогабаритных источников излучения в НИИ интроскопии была внедрена система менеджмента качества. Эта система прошла оценку и регистрацию уполномоченным органом National Quality Assurance Limited на соответствие требований стандарта BS EN ISO 9001:2000. Получен сертификат № 13936/6 от 07.12.2001 г. Соответствующий сертификат получен и предприятием ЗАО «Светлана-Рентген», производящим отпаянные ускорительные камеры для всех разработанных бетатронов.

Устойчивый спрос малогабаритных бетатронов на отечественном и зарубежном рынках обеспечивается их высокими техническими и эксплуатационными характеристиками.

Малогабаритные бетатроны неоднократно отмечались дипломами отечественных и международных выставок и конкурсов. В 2004 г. комплекс САВ-2000, использующий бетатрон «ВЕАМ» был признан лучшим из 20 представленных на конкурс в Польше досмотровых систем. Малогабаритный импульсный бетатрон МИБ-7.5 (РХВ-7.5) стал лауреатом конкурса «100 лучших товаров России» в 2005 году и конкурса «Лучшие товары и услуги Сибири – ГЕММА» в 2006 году. За продвижение собственной наукоемкой продукции на внешний рынок НИИ интроскопии награжден дипломом Томской торгово-промышленной палаты в 2006 году за серию малогабаритных бетатронов. За лучшую разработку в области радиационных методов неразрушающего контроля серия малогабаритных бетатронов отмечена дипломом 5-й Международной специализированной выставки и конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности-2006».

Разработанные источники рентгеновского и электронного излучения представляют собой пример создания российскими учеными и инженерами наукоемкой высокотехнологичной продукции, не имеющей аналогов в мировой практике. Заслуга относительно небольшого коллектива состоит так же в том, что он сумел организовать производство и сбыт своих разработок, в первую очередь, за рубеж. Только за период с 1999 года по 2007 год выпущено 190 малогабаритных бетатронов и 447 рентгеновских частотно-импульсных рентгеновских аппаратов на сумму более 350 млн рублей. Примерно 90 % бетатронов продано за рубеж, реализация которых дала около 10 млн долларов США.

## **ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ БЕТАТРОНОВ НИИ ИНТРОСКОПИИ ПРИ ТПУ В СОСТАВЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТОМОГРАФОВ «ПРОМИНТРО»**

*Э.И. Вайнберг, И.А. Вайнберг («ПРОМИНТРО», Москва)*

*В.Н. Касьянов, В.Л. Чахлов, М.М. Штейн (НИИ Интроскопии при ТПУ, Томск)*

Использование количественных средств неразрушающего контроля и аттестации сложной внутренней структуры – важный фактор отработки технологии и обеспечения надежности ответственных изделий современного машиностроения: автомобильных, авиационных и ракетных двигателей, вертолетных лопастей, охлаждаемых турбинных лопаток, навигационных датчиков, форсунок, сопел, элементов теплозащиты, топливо-распределительных систем управления ГТД, тормозных колодок, теплообменников, каталитических нейтрализаторов, сложных высокоэффективных боеприпасов, многослойных материалов и композитных конструкций.

К сожалению, традиционные средства измерений и неразрушающего контроля (НК), незаменимые при исследовании наружной поверхности или изделий простейшей формы типа листов или труб, не обеспечивают количественный контроль внутренней структуры сложных, пространственно развитых деталей и сборок.