

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА  
ИНДУКЦИОННЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ —  
БЕТАТРОНОВ В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ**

Л. М. АНАНЬЕВ, В. А. МОСКАЛЕВ

Бетатроном называется ускоритель электронов, основанный на использовании вихревого электрического поля, индуцированного переменным магнитным потоком.

В СССР теорией индукционного метода ускорения электронов и разработкой основ конструирования бетатронов начали заниматься еще в начале тридцатых годов, т. е. практически одновременно с Видером (1928) и Штейнбеком (1935), работавшими в Германии.

В. В. Ясинский в 1935 г. опубликовал результаты теоретических исследований движения электронов в квазистационарном и переменном электромагнитном поле аксиальной симметрии при наличии добавочного радиального электрического поля. При соответственно выбранных условиях существуют устойчивые орбиты движения электронов. В связи с этим В. В. Ясинский предложил при ускорении электронов в вихревом электрическом поле для выхода их на равновесную орбиту применять радиальное электрическое поле, действующее короткое время  $10^{-7}$ — $10^{-8}$  сек.

На возможность такого ускорения в космическом пространстве указывал также Я. Н. Терлецкий. Подобными исследованиями в 30-х годах в Сибирском физико-техническом институте (г. Томск) занимались А. К. Красин и А. А. Воробьев. Однако указанные работы в то время не получили должного практического развития.

Впервые устойчивое индукционное ускорение на основе разработанной одноэлектронной теории было достигнуто Д. Керстом в его ускорителе, включавшем все основные узлы современного бетатрона.

В 1943—1944 гг. среди других научных исследований в Советском Союзе были начаты работы по индукционному методу ускорения. Работы начались практически одновременно в физическом институте Академии наук СССР, в Москве, в Украинском физико-техническом институте в Харькове, в Уральском филиале Академии наук под руководством А. П. Комара, С. К. Сидорова, в СКБ Московского электрозавода, под руководством Б. Б. Гельперина, в Московском университете в группе проф. А. А. Соколова и Д. Д. Иваненко и др. Работы Томского политехнического института начались в 1944—1945 гг. Значительные силы, затраченные в этом большом коллективном труде, дали свои положительные результаты.

В настоящее время в СССР работает около трехсот бетатронов, из них около двухсот изготовлено в ТПИ. Параметры этих установок

в общем не хуже известных бетатронов, разработанных в других странах. Бетатроны Томского политехнического института изготавливаются различных типов применительно к практике их использования для целей дефектоскопии, терапии, биологических и физических научных исследований, геофизики и т. д. Основные данные о бетатронах ТПИ представлены в табл. 1.

В Томском политехническом институте разработка и исследование в области индукционного ускорителя электронов-бетатронов, осуществляемые под руководством А. А. Воробьева, пошли по трем направлениям: создание теории работы ускорителя, включая динамику электронов в камере и захват электронов в ускорение; разработка практических инженерных методов расчета бетатронов как электротехнической установки, позволивших создать методику расчета отдельных узлов ускорителя, удовлетворяющих выводам теории его работы, и, наконец, исследования в области применения в практических целях. Хотя к началу развития работ в ТПИ было известно несколько теорий работы бетатрона (Керст, Керст и Сербер и т. д.), однако они не позволили исследовать совокупность всех вопросов, связанных с индукционным ускорением электронов. Основным недостатком существовавших теорий и гипотез являлась попытка объяснить работу бетатрона путем анализа ускорения единичного электрона.

В Томском политехническом институте теоретические исследования сразу же пошли по пути создания многоэлектронной теории бетатрона, получившей свое развитие в трудах В. С. Мелихова и А. А. Воробьева, Б. Н. Родимова, П. А. Черданцева, О. В. Соколова и А. Г. Власова и др.

В результате этих исследований была создана теория бетатрона, которая объясняет захват электронов в ускорение прежде всего электростатическим взаимодействием электронов, уже сделавших один или несколько оборотов с электронами, выходящими в данный момент из инжектора. При этом у части электронов затухают радиальные колебания, что позволяет им обойти инжектор. Механизм этот малоэффективен, так как захватывает в ускорение ничтожную долю того заряда, который могут удерживать фокусирующие силы магнитного поля бетатрона.

В связи с этим Б. Н. Родимовым был предложен так называемый бесколебательный захват, при котором с помощью конракторной схемы орбита уводится за инжектор и уменьшением тока инжекции по специально рассчитанному закону добиваются бесколебательного, спирального ввода электронов в ускорение.

В исследованиях П. А. Черданцева была детализирована и развита теория бетатрона, предложенная Б. Н. Родимовым. Найден ряд соотношений между практически определяемыми величинами, например величиной напряжения инжекции и током ускоренных электронов на орбите. Интенсивность излучения определяется величиной отношения  $\sim I \cdot U^{-3/2}$ , где  $I$  — ток инжектора, а  $U$  — напряжение инжекции. Опыты О. В. Соколова подтвердили правильность теоретически полученных выводов и, следовательно, правильность теории захвата электронов в ускорении в определенных условиях.

В процессе ускорения электроны теряются вследствие усиления амплитуды радиальных или аксиальных колебаний, вызываемых неоднородностями магнитного поля. Некоторые частные случаи этой проблемы были описаны ранее, например Бардиным, Керстом и др. В ТПИ эта проблема исследовалась теоретически и экспериментально Л. С. Соколовым, О. В. Соколовым, К. С. Гришиным.

С целью повышения эффективности ускорителя были представлены работы по изучению влияния различных сосредоточенных и распре-

деленных дефектов управляющих магнитных полей на динамику электрона и подавлению раскачки колебаний электронов. Эти исследования дали несколько практически интересных выводов. В частности, исследовалось, что дает в индукционном ускорителе применение знакопеременной жесткой магнитной (Г. И. Димов) или электростатической фокусировки, применения нескольких электронных инжекторов и нескольких ускоряемых пучков для улучшения затухания колебаний (О. В. Соколов).

В результате теоретических и экспериментальных исследований оказалось возможным разработать методику проектирования и конструирования бетатронов различного применения.

Прежде всего были разработаны практические, инженерные методы расчетов электромагнитов бетатронов. Методы, предложенные в ТПИ М. Ф. Филипповым, с достаточной для практики точностью дают возможность выбрать основные параметры электромагнита и рассчитать все его размеры.

По результатам расчетов и экспериментальных исследований первых, опытных, бетатронов М. Ф. Филипповым была найдена взаимозависимость основных размеров и параметров электромагнита при соблюдении бетатронного условия, что и было использовано при разработке методов расчета. В дальнейшем эти расчеты были развиты в работах Л. М. Ананьева, который на основании соотношений, найденных М. Ф. Филипповым, получил законы подобия электромагнитов бетатронов и предложил критерии малогабаритности, положенные в основу проектирования малогабаритных и переносных бетатронов.

Относительно низкая интенсивность излучения обычных бетатронов сдерживает дальнейшее расширение области применения этих ускорителей. Поэтому одно из основных требований, предъявленных к бетатронам, как и к другим типам ускорителей, состоит в увеличении тока ускоренных частиц. Эта задача успешно разрешается в работах А. А. Воробьева и В. А. Москалева, завершившихся созданием сильноточного бетатрона, ускоряющего заряд, в сотни раз превышающий заряд, ускоряемый в обычных бетатронах.

Увеличение тока ускоренных частиц в сильноточном бетатроне получено за счет существенного изменения в основном двух параметров ускорителя, а именно:

- а) увеличения на порядок области действия фокусирующих сил управляющего магнитного поля бетатрона;
- б) значительного повышения начальной энергии электронов (до нескольких сот киловольт), при которой они вводятся в ускорение.

Увеличение объема магнитного поля в сильноточных бетатронах в свою очередь достигается путем увеличения геометрических размеров межполюсного пространства (путем относительного увеличения  $\delta_0$  в сильноточном бетатроне  $\frac{\delta_0}{z_0} \approx 1$ ). Поскольку это сопровождается

ростом габаритов и веса ускорителя и ростом потребляемой электрической энергии, увеличение межполюсного пространства ограничено некоторыми разумными пределами.

В процессе сооружения сильноточных бетатронов исследованы различные конструкции полюсов ускорителя, в частности полюса без корректирующих «kozyрьков», но с увеличенным радиальным размером, которые обеспечивают наибольшее приближение к теоретически заданной конфигурации магнитного поля; а также варианты профилей полюсов с переменным и постоянным в некоторых пределах вдоль радиуса полюса показателями спадания  $n$  магнитного поля.

При  $n(z) = \text{const}$  (вогнутый профиль) эффективность использования апертуры бетатрона несколько выше.

Разработанные и сооруженные сильноточные бетатроны обеспечивают высокую интенсивность излучения. Ускоряемый в них электронный заряд доведен до  $(1 \div 3) 10^{12}$  частиц за цикл ускорения.

В настоящее время разработан проект компактного сильноточного бетатрона, в котором за счет применения новых магнитных материалов, а также за счет соответствующих конструктивных изменений достигнуто четырехкратное снижение веса электромагнита сильноточного бетатрона.

В результате теоретических и технико-экономических исследований, а также опытно-конструкторских разработок учеными Томского политехнического института созданы весьма совершенные конструкции электромагнитов бетатронов разного назначения. Сюда относятся электромагниты с магнитопроводами со специальной шихтовкой, улучшающей структуру управляющего магнитного поля; с обмотками на стойках и ярмах, целесообразные для бетатронов с малым поперечным сечением; многостоечные и броневые, способствующие наилучшему использованию активных материалов, и экранирующее рассеянное излучение; двухкамерных бетатронов, обладающих рядом специфических особенностей, и т. д. Одновременно с электромагнитами интенсивно разрабатывались и схемы их питания.

Создавая бетатрон для массового применения по многим технико-экономическим соображениям начали разработку установки, питающейся от сети переменного тока промышленной частоты. Опыт показал, что выбор промышленной частоты был удачным. Это весьма упростило установку и повысило ее надежность, сократило площадь необходимых рабочих помещений. Применение повышенной частоты для питания обмоток электромагнитов бетатрона может оправдать себя только при создании установки специального назначения.

В лабораториях ТПИ проводились и исследования смешанного питания электромагнита постоянным и переменным токами. Было установлено, что использование подмагничивания для целей увеличения конечной энергии электронов экономически выгодно, начиная с энергии  $25 \div 35$  Мэв, в то же время использование простого смешанного питания для уменьшения реактивной мощности и потерь в электромагните в некоторых случаях оказывается целесообразным и в установках на значительно меньшие энергии, особенно при питании их током повышенной частоты. Недавно в ТПИ разработана более простая и надежная система подпитки электромагнита постоянным током, состоящая из дополнительной низковольтной обмотки на электромагните, полупроводникового выпрямителя и компенсационного трансформатора.

Для питания электромагнита токами повышенной частоты были разработаны простые и надежные в эксплуатации преобразователи на полупроводниковых приборах; с импульсным вводом энергии в контур, с перезарядом емкости, а также импульсные генераторы с большой частотой повторения импульсов тока.

Целью указанных исследований являлась разработка экономичной электромагнитной системы ускорителя, позволяющей получать заданные параметры излучения при наименьшем расходе материалов. Этому же способствовали и предложения по использованию собственной емкости обмотки для компенсации реактивной мощности и по компенсации сжатия равновесной орбиты в конце ускорения путем сдвига по фазе ускоряющего потока насыщения внешних областей полюсов.

Помимо совершенных электромагнитов и устройств для их питания создание высоконадежного и эффективного бетатрона предполагает разработку и всех его остальных систем с надлежащими характеристиками и параметрами. Это привело к необходимости тщательного

изучения динамики ускоряемых электронов не только в период формирования пучка, но и в процессе всего цикла ускорения.

А. Г. Власов представил методику расчета потерь электронов на остаточном газе, которую целесообразно применять для инженерных расчетов при проектировании и эксплуатации ускорителей. Исследования изменения потерь электронов от химического состава остаточного газа в камере показали, что при заполнении камеры легкими газами — гелием и водородом — потери уменьшаются на порядок. Поэтому рабочий вакуум в камере может быть снижен на порядок, что важно при изготовлении отпаянных камер ускорителей.

Разработана методика наблюдения за пучком в процессе его ускорения с помощью сцинтиляционного счетчика, устанавливаемого в непосредственной близости от ускорительной камеры. Методика дает возможность на экране осциллографа наблюдать за процессом потери электронов в цикле ускорения по свечению, вызываемому ими при попадании на стенку камеры, а также провести количественные измерения этих потерь. Исследовано уменьшение числа электронов за весь цикл ускорения и указаны способы увеличения продолжительности жизни электронов в камере бетатрона.

Получив такой вывод о необходимом рабочем давлении в камере бетатронов, были разработаны конструкции и технология полупотпаянных камер бетатрона с титановым насосом. В. П. Пономарев создал интересные конструкции титановых насосов необходимой мощности и камеры с такими насосами для бетатронов на различные энергии.

Л. М. Ананьевым и возглавляемым им коллективом отработана конструкция и технология изготовления отпаянных камер для малогабаритных бетатронов. Эти камеры характеризуются простотой конструкции и достаточной надежностью в эксплуатации. В последнее время параметры отпаянных малогабаритных камер улучшены за счет применения внешнего инжектора с инфлектором, позволяющего, как показали исследования, увеличить даже в камерах малого сечения напряжение инъекции, долговечность и эффективный объем. Это позволило существенно повысить заряд, ускоряемый в бетатроне.

Большие работы по конструированию ускорительных камер были проведены под руководством В. А. Москалева при разработке высоко- точных бетатронов. Значительный объем этих камер привел к необходимости коренным образом пересмотреть всю электровакуумную систему. Прежде всего это сказалось на конструктивных особенностях самой вакуумной ускорительной камеры. Камера для высокоточного бетатрона на 25 Мэв имеет площадь радиального поперечного сечения более 500 см<sup>2</sup> и объем свыше 100 литров, что не позволило применить технологию изготовления литых (цельных) камер, как это имеет место для обычных бетатронов, и обусловило применение секторной конструкции.

Камера изготавливается из глазурированного фарфора и состоит из шести секторов, склеенных эпоксидным компаундом. Внутренняя поверхность камеры покрыта проводящим слоем из двуокиси олова. Электрическое соединение слоя отдельных секторов осуществляется через медные фольги по наружному периметру камеры. Камера имеет 12 патрубков для размещения высоковольтного инжектора, инфлектора, обмоток окончательного сброса, индукционного электрода, мишеней и т. п. Откачка камеры осуществляется мощным многоступенчатым насосом типа ВА-1М с производительностью 1000 л/сек. Рабочий вакуум составляет  $5 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-5}$  тор.

Стремление повысить интенсивность излучения и его качество заставило обратить пристальное внимание на системы инъекции, смещения и управления бетатрона. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования по выяснению параметров инъекции на работу бетатрона позволили создать весьма совершенные источники высокого импульсного напряжения с оптимальными для каждого случая характеристиками импульса и конструкцией системы. Разработанные конструкции генераторов инъекции для бетатронов на средние энергии отличаются простотой, небольшими габаритами и способностью создавать напряжение инъекции до  $80 \div 100$  кв. Специфические особенности малогабаритных бетатронов привели к созданию малогабаритных импульсных генераторов на полупроводниковых приборах с импульсными трансформаторами с твердым диэлектриком. Объем таких источников напряжения инъекции не превышает  $500 \text{ см}^3$ .

Для полного вывода ускоренного равновесного электронного заряда на орбиту предложены контракторы различного устройства. Ю. М. Акимов исследовал фокусирующее действие контракторов и сделал вывод, что применение контрактора дает увеличение интенсивности излучения в несколько раз, если бетатрон не настроен на максимум излучения. Когда установка хорошо отрегулирована и дает максимально возможное в данных случаях излучение, применение контрактора может увеличить выход только на 40—60%. Были также предложены ферромагнитные и электронные контракторы.

Большой круг исследования был проведен при разработке систем смещения электронов с равновесной орбиты и вывода их из камеры бетатрона. Созданные системы смещения отличаются оригинальностью и высокой эффективностью. Так, предложены системы смещения с заорбитной обмоткой, с короткозамыкающими обмотками и системы быстрого сброса. Их питание осуществляется от аналогичных генераторов на газоразрядных и полупроводниковых приборах.

Для вывода электронов из камеры бетатрона проведены детальные исследования поведения электронов на конечном этапе процесса ускорения. Были разработаны и осуществлены оригинальные варианты трех методов вывода электронного пучка из камеры кольцевого ускорителя:

1. С помощью отклонения пучка электростатическим полем и различных типов дефлекторов, разработанных Б. А. Кононовым.
2. С помощью магнитных шунтов и безмагнитных туннелей для вывода электронов, разработанных Л. С. Соколовым, Ю. М. Акимовым.
3. С помощью магнитных катушек или методов флуктуаций магнитного поля, разработанных Л. С. Соколовым.

В работе находится свыше 10 бетатронов с выведенными электронными пучками. Величина среднего тока в выведенном пучке достигает  $10^{-8} \text{ а}$ , а мощность дозы до  $10000 \text{ рентген/мин}$ .

Исследования по выводу пучка, продолженные в последнее время В. П. Анохиным, привели к разработке параметрических систем вывода, обладающих большой эффективностью особенно в ускорителях с большим воздушным зазором.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования проведены для повышения качества излучения, генерируемого бетатроном, путем разработки и использования эффективных систем управления и стабилизации мощности дозы и энергии излучения.

В. М. Разиным, В. И. Горбуновым, Е. М. Беловым, О. И. Недавим, М. М. Штейном и др. созданы системы стабилизации мощности дозы, напряжения и тока инъекции. Системы стабилизации излучения по отклонению, уровню и экстремальные нашли широкое применение в практике бетатроностроения. В последнее время В. М. Разиным и Рябухи-

ным разработаны специализированные вычислительные устройства для оптимизации условий инжекции.

Р. П. Мещеряковым разработаны приборы для контроля за максимальной энергией излучения бетатрона и ее стабилизацией, приборы для контроля интенсивности и интегральной дозы и детекторы излучений. В опытах достигнута точность стабилизации максимальной энергии  $25 \text{ МэВ} \pm (10 \div 15) \text{ КэВ}$ .

Детальное исследование причин, влияющих на стабильность излучения, показало, что определяющим дестабилизирующим фактором является нестабильность питающего напряжения. В связи с этим М. М. Штейном и Г. С. Воробьевой разработаны простые конструкции ферромагнитных и полупроводниковых стабилизаторов питающего напряжения. Их отличительной особенностью является то, что для стабилизации напряжения используются нелинейные свойства электромагнита бетатрона и высокая добротность его колебательного контура.

Большинство действующих в настоящее время бетатронов позволяет ускорять за один цикл  $10^9 \div 10^{10}$  частиц, что в ряде случаев применения оказывается недостаточным. В частности, для импульсной рентгенографии быстропротекающих процессов требуется ускорять за цикл число частиц по крайней мере на два порядка больше. Такое увеличение ускоряемого в импульсе заряда возможно получить только при одновременном значительном повышении «емкости» области устойчивости, напряжения инжекции и тока инжекции. Эта задача была решена коллективом под руководством В. А. Москалева, и результатом проделанной работы явилось создание особой группы бетатронов, называемых сильноточными.

Теоретическое обоснование возможности решения поставленной задачи произведено Б. Н. Родимовым и П. А. Черданцевым.

Б. В. Окуловым разработана методика инженерного расчета высоковольтных инжекторных устройств и создано несколько вариантов конструкций на напряжение  $200\text{—}300 \text{ кВ}$  и ток  $10 \text{ а}$  и более, обеспечивающих введение и захват в область устойчивости бетатрона до  $10^{13}$  электронов за импульс.

Для питания высоковольтных инжекторных устройств Ю. М. Скворцовым разработаны мощные высоковольтные генераторы напряжения инжекции на  $200 \div 400 \text{ кВ}$ .

В. Г. Шестаковым решена задача смещения за короткое время пучка ускоренных электронов с равновесной орбиты на мишень в бетатроне с большим зазором между полюсами. Достигаемая при этом длительность импульса излучения меньше, чем  $0,2 \text{ мксек}$ , что дает возможность производить съемку быстропротекающих физических или химических процессов и быстродвижущихся деталей машин и механизмов.

Осуществление вывода интенсивного электронного пучка из ускорительной камеры сильноточного бетатрона в атмосферу еще более расширило область применения индукционного ускорителя. В. В. Шашовым впервые в практике бетатроностроения решена задача вывода электронного пучка из бетатрона импульсным однооборотным способом, что дало возможность получить импульсы тока выведенного пучка длительностью  $5\text{—}6 \text{ нсек}$  и мощность пучка в импульсе до  $120 \text{ Мвт}$  (энергия электронов —  $25 \text{ МэВ}$ ). Величина среднего тока в выведенном пучке достигает  $10^{-6} \text{ а}$ , а мощность дозы до  $10^6 \text{ рад/мин}$ . В качестве выводного устройства используется импульсный магнитный дефлектор, представляющий собой две соединенные параллельно короткозамкнутые на конце линии, согласованные с питающим их высоковольтным генератором наносекундных импульсов. Работа схемы генератора основана на разряде безиндуктивной емкости на формирующую коаксиальную

линию через коммутирующий управляемый разрядник с последующим разрядом формирующей линии на передающую линию и на дефлектор через обостряющий разрядник. Оба разрядника находятся под высоким давлением азота, равным 15 атм. В качестве коммутирующего разрядника применен разрядник типа «тригатрон», предложенный Джонсоном (США). Отличительной особенностью такого разрядника является поджигающий электрод, выполненный в виде тороида, расположенного вблизи катода. Поджигающий электрод практически не обгорает, так как через него не проходит рабочий ток. При заполнении коммутирующего разрядника азотом генератор стабильно работает при частоте повторения импульсов 25 гц. Выходные параметры генератора при этом следующие: амплитуда импульса напряжения — 100 кв, длительность импульса 13 нсек, длительность фронта импульса около 1,5 нсек. Импульсная мощность генератора составляет 400 Мвт.

Осуществлен также вывод электронного пучка из сильноточного бетатрона электростатическим способом с помощью выводного устройства, представляющего собой конденсатор с удлиненной отклоняющей пластиной. Этот способ вывода дал возможность получить импульсы тока в выведенном пучке длительностью до 1 мксек. Средний ток пучка также составляет около  $10^{-6}$  а.

В сильноточных бетатронах впервые в практике бетатроностроения была обнаружена когерентная неустойчивость пучка в процессе ускорения, обусловленная конечной проводимостью окружающих стенок и приводящих к потере значительной части захватываемого в ускорение заряда. Задача подавления этой неустойчивости в настоящее время решается.

В результате экспериментального исследования процесса ускорения в сильноточных бетатронах установлено, что наибольшей «емкостью» обладает магнитное поле бетатрона, профиль полюсов которого обеспечивает монотонное возрастание по радиусу. В этом случае, при всех прочих равных условиях, захватывается и доходит до конца цикла ускорения число частиц почти на порядок больше, чем в бетатроне с полюсами, обеспечивающими  $n(r) \approx \text{const}$ . Данными экспериментами доказаны возможности и преимущества так называемого оптимального поля, теоретические основы получения которого даны Б. Н. Родимовым. Применение наиболее «емкого» поля в обычных и малогабаритных бетатронах (при условии, что одновременно будут усовершенствованы и системы инжекции) может дать существенное повышение интенсивности пучка, даваемого этими ускорителями.

Для стереоскопической рентгенографии В. А. Москалевым предложена оригинальная конструкция двухкамерного стереобетатрона, обладающего рядом преимуществ по сравнению с однокамерными двухлучевыми бетатронами.

В частности, в двухкамерном стереобетатроне два электронных пучка ускоряются одновременно, что позволяет, например, производить стереоскопический контроль быстропротекающих процессов. Кроме того, в двухкамерном стереобетатроне расстояние между источниками излучения превышает соответствующую величину в двухлучевом бетатроне. Последнее значительно повышает точность стереоскопического контроля.

Указанные выше и многочисленные другие исследования по физике и технике индукционного ускорения позволили научным сотрудникам Томского политехнического института создать надежные в эксплуатации, не уступающие мировым стандартам индукционные ускорители разного практического применения. Так, для дефектоскопии материалов в промышленных условиях под руководством В. И. Горбунова созданы бетатроны на среднюю энергию.



Для радиационного контроля крупногабаритных изделий и строительных конструкций на стапелях, аэродромах, в цехах, полевых и других нестационарных условиях в Томском политехническом институте созданы малогабаритные переносные бетатроны типа ПМБ.

Параметры излучения, генерируемого этими ускорителями (энергия  $3 \div 6$  Мэв), позволяют с их помощью просвечивать стальные изделия с толщиной до  $100-200$  мм и слой бетона с толщиной до  $600$  мм.

Конструктивно бетатроны типа ПМБ выполняются в виде отдельных блоков, вес и габариты которых позволяют осуществлять их ручную транспортировку без применения специальных подъемно-транспортных средств силами одного-двух человек. В качестве примера на рис. 1 приведен полный комплекс бетатрона ПМБ-6, генерирующего жесткое тормозное излучение с максимальной энергией  $6$  Мэв и мощностью дозы  $0,6$  р/мин. м. Установка включает излучатель, содержащий электромагнит многостончного типа, ускорительную камеру, датчик излучения, системы инжекции и смещения электронов, а также вентилятор и защитно-блокировочную аппаратуру. Излучатель помещается на передвижном штативе, позволяющем изменять высоту и направление излучения в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Излучатель имеет габариты  $400 \times 400 \times 500$  мм<sup>3</sup> и вес около  $60$  кг.

В комплект установки также входит блок компенсационной конденсаторной батареи, пульт управления, в котором сосредоточены все регулирующие органы и контрольные приборы. Установка питается от сети промышленной частоты напряжением  $220$  в, потребляемая мощность  $1,2$  ква.

Создание подобной установки стало возможным благодаря многочисленным теоретическим и экспериментальным исследованиям, некоторые результаты которых защищены авторскими свидетельствами, в настоящее время запатентованы в Англии, ГДР, ФРГ, Швейцарии, США, Франции, Чехословакии.

Установка ПМБ-6 экспонировалась на международной выставке в Вене и международной ярмарке в Лейпциге, где она была приобретена немецкой фирмой.

В Советском Союзе в настоящее время на различных промышленных предприятиях министерств авиационной, судостроительной, химической и т. д. промышленности успешно эксплуатируется около  $20$  таких бетатронов. Институт имеет предложения еще о поставке  $100 \div 150$  шт.