

## БЕТАТРОНЫ НИИ ЭИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ И МЕДИЦИНЫ

В. И. ГОРБУНОВ, Г. А. КУНИЦЫН, О. В. СОКОЛОВ

В настоящее время ионизирующие излучения нашли широкое применение в неразрушающих методах контроля различных материалов и изделий. Контроль изделий большой толщины требует применения ионизирующего излучения с энергией в десятки *Мэв*. Применение изотопных источников  $\gamma$ -излучения и рентгеновских аппаратов в данном случае становится затруднительным из-за большого времени экспозиции и плохой выявляемости.

Источниками высокоэнергетического тормозного излучения являются ускорители электронов (микротроны, синхротроны, линейные ускорители, бетатроны, ускорители прямого действия). Наиболее широкое распространение в радиационном контроле при большой толщине контролируемых образцов получили бетатроны. Достаточно указать, что только в нашей стране насчитываются десятки бетатронов на различные энергии, которые в течение длительного периода эксплуатируются на предприятиях как источники излучения при радиационном контроле толстостенных изделий из различных материалов.

Распространенность бетатронов объясняется наличием следующих качеств:

1. Высокая энергия тормозного излучения. Возможность плавной регулировки энергии, что позволяет производить контроль материалов различной плотности в широком диапазоне толщин.

2. Относительная простота конструкции и эксплуатации бетатрона по сравнению с такими ускорителями, как микротрон, линейный ускоритель, синхротрон.

3. Малые размеры фокусного пятна, что позволяет получать высокую чувствительность к выявляемым дефектам.

4. Возможность получения достаточной по величине мощности дозы излучения.

5. Надежность работы.

В НИИ электронной интроскопии при ТПИ разрабатываются и изготавливаются бетатроны на средние энергии и интенсивности, предназначенные в основном для дефектоскопии материалов и изделий. Помимо этого, бетатроны применяются для гамма-терапии, акти-вационного анализа, биологических и физических экспериментов. С помощью бетатронов, разработанных в НИИ ЭИ, возможен высокопроизводительный контроль материалов и изделий толщиной до 500 мм (по

стали), контроль неоднородных и многокомпонентных материалов (типа бетона и железобетона) — до толщин порядка 4—4,5 т/м<sup>2</sup>. Установки разрабатываются как в стационарном варианте, так и на механизме перемещения, позволяющем производить перемещение бетатрона в пределах лаборатории, цеха или строительной площадки. Разрабатываются и транспортабельные варианты. В этом случае бетатрон может транспортироваться с помощью автомашины, электрокара или другого транспортного средства.

При разработке бетатронов много внимания было уделено исследованию процесса инжекции электронов в бетатрон. Захват электронов в ускорение рассматривался как процесс коллективного взаимодействия. Исследования по изучению механизма захвата электронов в ускорение ведутся как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. Полученные результаты позволяют перейти к практическому увеличению эффективности захвата электронов в ускорение.

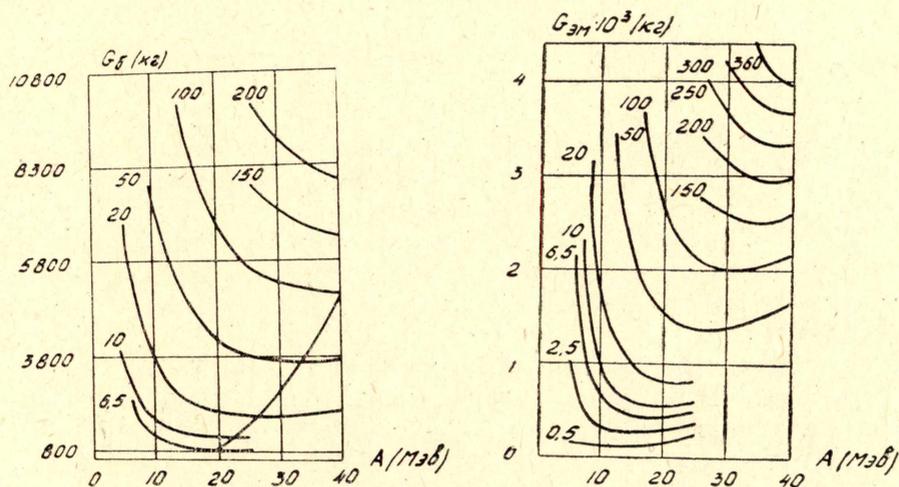


Рис. 1. Зависимость веса конденсаторной батареи  $G_6$  от энергии  $A$

Рис. 2. Зависимость веса электромагнита  $G_{эм}$  от энергии  $A$

Большая работа проведена по усовершенствованию электромагнита бетатрона. Разработаны электромагниты симметричной многостоечной конструкции, обладающие улучшенными, по сравнению с Ш-образными, магнитными, механическими и весовыми характеристиками. Повышение механической жесткости электромагнита повысило стабильность магнитных характеристик и уменьшило уровень акустического шума электромагнита.

При расчете электромагнитов бетатронов необходимо стремиться к тому, чтобы при высокой надежности работы в заданном режиме масса электромагнита и его стоимость были минимальны. Для проведения расчетов бетатронов с оптимальными параметрами в НИИ ЭИ разработана методика расчета и составлена программа для расчетов на ЭЦВМ М-20. Расчет сводится к определению зависимостей основных параметров бетатронов от конечной энергии ускоренных электронов при заданной мощности дозы тормозного излучения.

На рис. 1 и 2 приведены графики, иллюстрирующие зависимость веса электромагнита бетатрона  $G_{эм}$  и веса конденсаторной батареи  $G_6$  от максимальной энергии и мощности дозы  $\gamma$ -излучения при заданных постоянных значениях напряжения инжекции и индукции в центральной части электромагнита. Характерной чертой графиков является наличие минимумов на более или менее плавных кривых, что позволяет выбрать такие параметры, при которых бетатрон будет оптимальным по той или

инной характеристике (вес установки в целом или отдельных ее узлов, реактивная мощность конденсаторной батареи, мощность дозы на единицу веса, расход электроэнергии и др.) или группе характеристик.

На основе разработанной методики рассчитан и изготовлен бетатрон Б-18, отличающийся высокими удельными показателями.

Технические характеристики четырех образцов бетатронов, разрабатываемых и изготавливаемых в НИИ ЭИ в настоящее время, приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ пп.		Б-18	Б-25/10	Б-30	Б-35/8
1	Максимальная энергия ускоренных электронов, <i>Мэв</i>	18,5	25	30	35
2	Мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени, <i>рад/мин</i>	15	40	170	250
3	Стабильность мощности дозы при изменении питающего напряжения на $\pm 10\%$ — не хуже, %	1,5	1,5	1,5	1,5
4	Мощность питания (сеть 220 в 50 гц), <i>квт</i>	3,5	10	40	30
5	Реактивная мощность конденсаторной батареи, <i>квар</i>	120	800	1800	1820
6	Габариты электромагнита, <i>мм</i>	500×600× ×950	1200×1200 ×1200	1200×1700 ×1500	1510×1370 ×1010
7	Вес электромагнита, <i>кг</i>	500	2500	5000	4500
8	Радиус равновесной орбиты, <i>см</i>	10,8	18,5	24,5	24,5
9	Высота межполюсного зазора на радиусе $r_0$ , <i>см</i>	4,0	6,2	8,5	8,5

Бетатроны Б-25/10, Б-30 и Б-35/8 внедрены в производство, в частности, один из бетатронов Б-25/10 в течение ряда лет успешно эксплуатируется на Барнаульском котельном заводе. В настоящее время НИИ ЭИ изготавливает для БКЗ второй бетатрон Б-25/10. Бетатроны Б-30 внедрены на ряде предприятий, бетатрон Б-35/8 внедрен на Ижорском заводе им. Жданова, еще два таких бетатрона изготовлены для Уралхиммаша (г. Свердловск) и завода им. Орджоникидзе (г. Подольск). Бетатрон Б-30 имеет электромагнит Ш-образной конструкции. Общий вид бетатрона приведен на рис. 2а. Бетатроны Б-30 применяются в лабораторных исследованиях, в дефектоскопии и медицине. Для перемещения бетатрона в пределах лаборатории или цеха разработан механизм перемещения бетатрона. В настоящее время

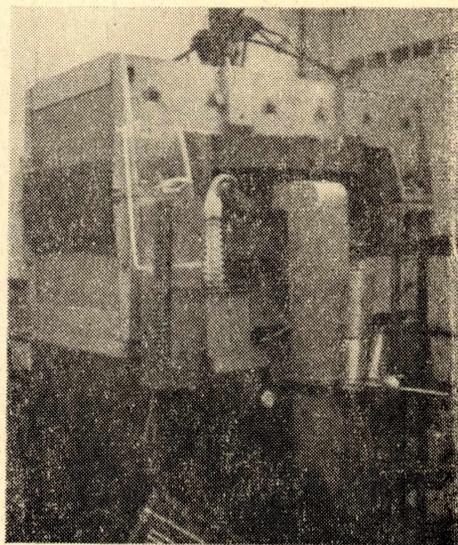


Рис. 2а. Общий вид бетатрона Б-30

бетатрон Б-30 может быть укомплектован отпаянной вакуумной камерой. На базе бетатрона Б-30 разработан вариант двухлучевого бетатрона, дающего на одной вакуумной камере 2 параллельных или сходящихся пучка  $\gamma$ -излучения. Это позволяет просвечивать одновременно 2 участка контролируемого объекта или получать стереоснимки дефектных участков.

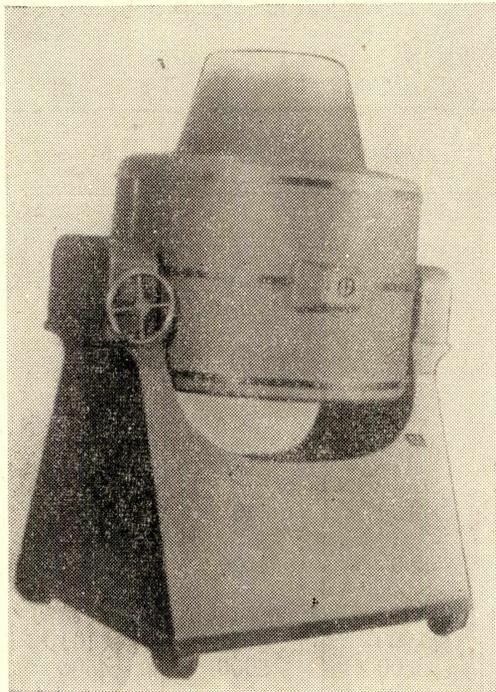


Рис. 3. Общий вид бетатрона Б-25/10

Разработка бетатрона Б-25/10 была предпринята с целью создания установки, отвечающей требованиям, предъявляемым к современным бетатронам для дефектоскопии и медицины. На этом бетатроне был опробован ряд принципиально новых технических решений, нашедших дальнейшее развитие в более поздних конструкциях бетатронов Б-35/8 и Б-18.

На рис. 3 приведен общий вид бетатрона Б-25/10. Бетатрон имеет симметричный десятистоечный магнитопровод. Достоинствами такой конструкции электромагнита являются уменьшение габаритов и веса по сравнению с Ш-образной, более равномерная статическая и фазовая азимутальная структура магнитного поля, возможность использования стоек электромагнита в качестве элементов защиты от рассеянного излучения. Механическая жесткость конструкции повышается за счет сборки половин магнитопровода из цельноштампованных пластин, которые собираются в пакеты, стягиваются шпильками и крепятся к силовым плитам. На рис. 4 приведен общий вид собранной половины магнитопровода. Для сборки стоек и электромагнита разработаны специальные пресс-формы. Благодаря применению пресс-форм, размеры и

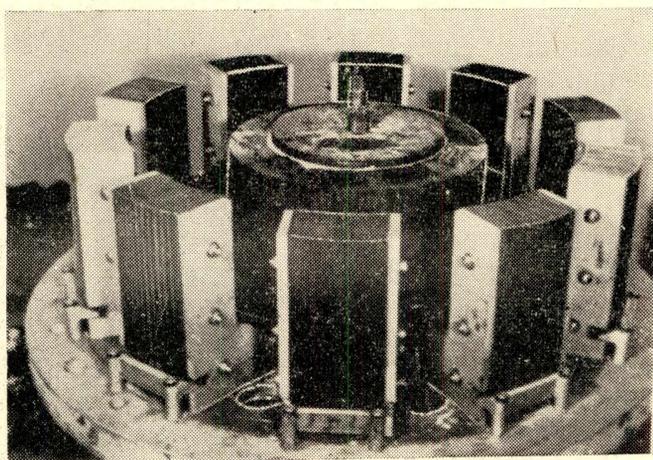


Рис. 4. Магнитопровод бетатрона Б-25/10 в процессе сборки

коэффициент заполнения сталью отдельных стоек электромагнита имеют минимальный разброс. Достигнуты хорошая повторяемость магнитных характеристик отдельных стоек, высокая точность сборки магнитопровода. В результате получена удовлетворительная естественная фазовая структура магнитного поля, почти не нуждающаяся в корректировке. На рис. 5 приведена азимутальная фазовая структура магнитного поля

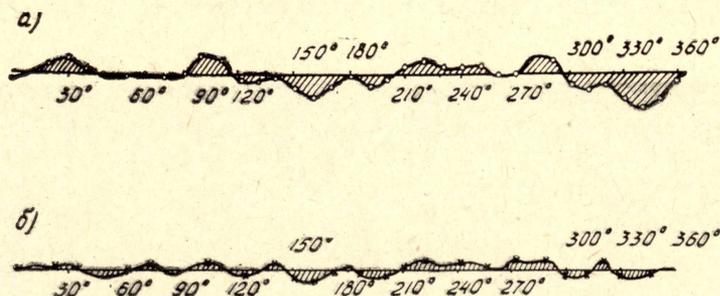


Рис. 5. Азимутальная фазовая структура бетатрона Б-25/10

бетатрона Б-25/10. Структура имеет явно выраженную 10-ю гармонику, вклад наиболее опасных низших гармоник незначителен. Абсолютная величина фазовой неоднородности невелика.

Охлаждение электромагнита осуществляется осевым вентилятором СВМ-4М, установленным на верхней плите. Система воздухопроводов на плитах обеспечивает обдув намагничивающих катушек и вакуумной камеры.

Бетатрон укомплектован отпаянной вакуумной камерой типа БУК-25, разработанной Ленинградским ОКБ «Светлана». Применение отпаянной вакуумной камеры значительно упрощает эксплуатацию бетатрона и повышает его надежность.

Бетатрон Б-35/8 с максимальной энергией ускоренных электронов 35 Мэв и мощностью дозы гамма-излучения 250 рад/мин 1 м предназначен в основном для промышленной дефектоскопии. С помощью этого бетатрона можно проводить контроль качества стальных изделий толщиной до 600 мм, а изделий из материалов малой плотности ( $1,8-2,5 \text{ г/см}^3$ ) — толщиной до 2000 мм. Вес и габариты установки уменьшены по сравнению с предыдущей моделью — бетатроном Б-30 за счет лучшего использования активных материалов (стали и меди электромагнита) и ряда конструктивных усовершенствований. На рис. 6 приведен общий вид бетатрона Б-35/8 в облицовке. Компактность установки достигнута за счет симметричной конструкции магнитопровода и рационального размещения импульсных схем и системы охлаждения. Для бетатрона разработана отпаянная вакуумная камера БУК-35 (рис. 7). Срок службы катода инжектора в испытанных образцах камер около 5000 часов. Рабочее напряжение инжекции — 70 кв. Рекомендуемый диапазон толщин при радиографии до 450 мм по стали или  $2,5 \text{ т/м}^2$  для бетона и железобетона.

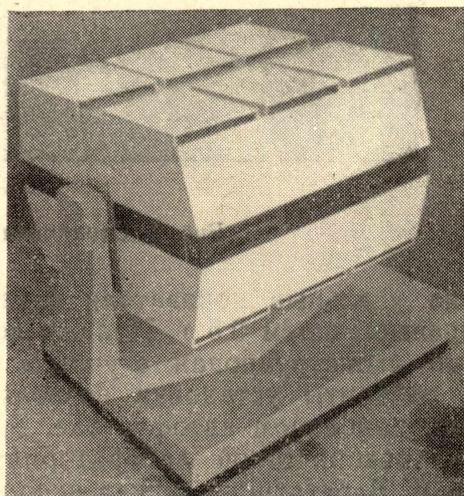


Рис. 6. Общий вид бетатрона Б-35/8.

Бетатрон Б-18,5 предназначен для проведения дефектоскопии промышленных изделий, сварных соединений, строительных узлов и конструкций методом просвечивания в лабораторных, цеховых условиях или на строительной площадке. Чтобы удовлетворить этим условиям, установка должна быть транспортабельной. Применение при расчете и конструировании бетатрона описанной выше методики расчета по оптимальным характеристикам позволило получить достаточно высо-

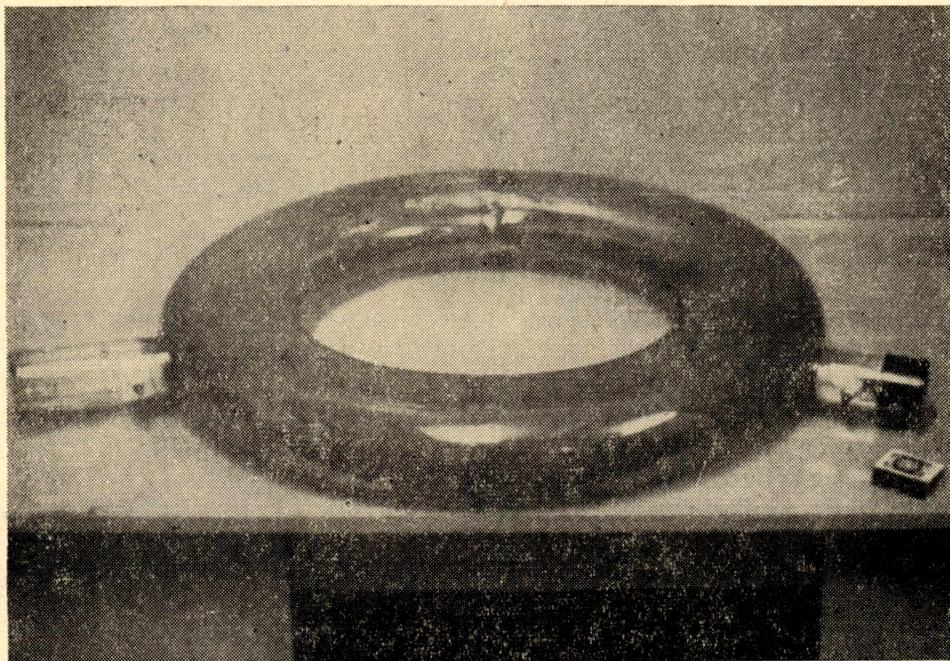


Рис. 7. Отпаянная вакуумная камера БУК-35

кие удельные показатели бетатрона при весе отдельных блоков, не превышающем 0,5 т. Полный вес установки не превышает 1,2 т. Бетатрон сконструирован с учетом возможности его транспортировки. Вес и габариты установки позволяют разместить ее в кузове автомобиля или прицепном автофургоне. Разрабатывается проект передвижной дефектоскопической лаборатории, в комплект которой входит бетатрон Б-18. В бетатроне может использоваться как отпаянная вакуумная камера, так и фарфоровая вакуумная камера с титановым насосом, электромагнит бетатрона размещен в литом силуминовом корпусе, в этом же корпусе размещаются импульсный трансформатор инъекции и вентиляторы системы охлаждения. Рекомендуемый диапазон толщин при радиографии до 300 мм по стали или  $2,5 \text{ т/м}^2$  для бетона.

В настоящее время в НИИ ЭИ продолжают работы по усовершенствованию имеющихся бетатронов и по разработке новых конструкций.