

## ЭЛЕКТРОННЫЕ УСКОРИТЕЛИ ТПИ

И. П. ЧУЧАЛИН

Томским политехническим институтом внесен значительный вклад в разработку электронных ускорителей. Создание первого советского бетатрона в ТПИ относится к первым послевоенным годам (1946—1947 гг.). По инициативе и под руководством профессора А. А. Воробьева небольшая группа физиков и инженеров, фактически изолированная от внешнего мира в силу условий того времени, дерзнула разработать и создать сложное электрофизическое устройство. Пионерами первых томских и советских бетатронов вместе с профессором А. А. Воробьевым являлись доценты ТПИ: А. К. Потужный, В. Н. Титов, М. Ф. Филиппов.

Томским политехническим институтом разработано, изготовлено и установлено в различных научных учреждениях, вузах, промышленных предприятиях, клиниках нашей страны и за ее рубежом более 60 бетатронов с маркой ТПИ. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные сотрудниками ТПИ, охватывают широкий круг вопросов в области создания магнитных полей бетатронов [1—5], процесса захвата электронов в ускорение [6—11], выводу электронов из ускорительной камеры [12—14], изучению спектральных и угловых характеристик тормозного излучения и электронных пучков [15—16], разработке электрических схем питания, управления и стабилизации излучения [17—20] и т. д.

В табл. 1 приведены основные типы бетатронов, разработанные в ТПИ, с указанием их характеристик.

Изготовленные в ТПИ бетатроны широко используются в области ядерной и радиационной физики, радиационной химии, в медицине и биологии, в промышленности, особенно для дефектоскопии изделий [21—26].

Ниже приводится несколько примеров применения бетатронов ТПИ.

Для Барнаульского котельного завода разработан и внедрен в производство впервые в мировой практике комплексный бетатронный дефектоскоп БД-2 на 25 МэВ для контроля толстостенных сварных соединений. Дефектоскоп позволяет вести непрерывный автоматический контроль сварных швов толщиной до 350 мм и шириной до 100 мм с производительностью до 30 км швов за один месяц.

Для Ангарского нефтеперерабатывающего завода разработан комплексный бетатронный дефектоскоп БД-1, который позволяет осу-

ществлять автоматический контроль стальных поковок толщиной до 500 мм производительностью 2 м<sup>2</sup>/час.

Применение комплексных бетатронных дефектоскопов для контроля качества материалов и изделий позволяет в десятки раз сократить

Таблица 1

Характеристики основных типов бетатронов, разработанных в ТПИ

Марка бетатрона	Максимальная энергия ускорен. электронов, Мэв	Интенсивность излучения или ускоряемый заряд в импульсе	Частота питающего тока, гц	Тип магнитопровода	Радиус равновесной орбиты, см	Высота междуплоского зазора на радиусе равновесной орбиты, см	Потребляемая мощность, квт	Вес активных материалов электромагнита, т	Год выпуска первого образца
Б-9	9	5 р/мин. м	50	Ш-образный	11,0	8,0	5,0	1,0	1961
Б-15	15	10 р/мин. м	50	Ш-образный	13,0	6,4	6,0	1,2	1948
Б-25	25	40 р/мин. м	50	Ш-образный	21,0	7,0	15,0	3,3	1955
Б-30	30	150 р/мин. м	50	Ш-образный	24,5	8,5	35,0	6,6	1959
Б25/10	25	40 р/мин. м	50	10-стоечный	18,5	6,14	10,0	2,1	1962
Б-30 2-лучевой	30	2×150 р/мин. м	50	Ш-образный	24,5	8,5	35,0	6,6	1965
Б-10 2-камерный	10	5·10 <sup>9</sup>	50	Ш-образный	13,0	6,4	5,0	1,2	1958
Б-15 2-камерный	15	5·10 <sup>9</sup>	50	Ш-образный	13,0	6,4	7,0	1,4	1959
СБ-25 2-камерный	25	3·10 <sup>12</sup>	0,25	Ш-образный	23,0	21,0	25,0	15,0	1961
СБ-25	25	7·10 <sup>11</sup>	50	Ш-образный	23,0	21,0	50,0	8,0	1964
ПМБ-3	3	0,05р/мин. м	50	Броневой	4,5	4,0	0,6	0,025	1962
ПМБ-5	5	0,1 р/мин. м	50	12-стоечный	4,6	2,6	0,6	0,028	1966
ПМБ-6	6	0,3 р/мин. м	50	12-стоечный	6,0	4,0	1,8	0,060	1964
ПМБ-6с	6	0,3 р/мин. м	50	12-стоечный	6,0	4,0	1,5	0,090	1968
СШ Б-200	5	0,05 р/мин. м	50	Ш-образный	6,0	4,0	1,0	0,080	1961

время контроля по сравнению с радиографическими методами радиационной дефектоскопии при высокой чувствительности к выявляемости дефектов.

Бетатроны, изготовленные институтом, неоднократно экспонировались на Выставке достижений народного хозяйства. За бетатроны на 25 Мэв и 30 Мэв институт награжден почетными дипломами 1-й степени, а ведущие научные сотрудники — медалями ВДНХ.

В научно-исследовательском институте ядерной физики, электроники и автоматики Томского политехнического института (НИИ ЯФ ТПИ) разработано и внедрено в эксплуатацию несколько типов высокоточных бетатронов и двухкамерных стереобетатронов [27—31]. Благодаря применению высоковольтной системы инжекции и увеличению зоны фокусирующих сил в высокоточных бетатронах ускоряется более 10<sup>12</sup> электронов в импульсе, что более чем в 100 раз превышает ускоренные токи, получаемые в лучших образцах бетатронов известных зарубежных фирм Броун—Бовери и Сименс.

На рис. 1 приведена фотография сильноточного бетатрона СБ-25 с энергией ускоренных электронов 25 Мэв. Некоторые конструкции стереобетатронов экспонировались на советских выставках в США и Чехословакии. На ВДНХ они награждались дипломами, а их создатели — медалями.

Применение сильноточных бетатронов для дефектоскопии толсто-стенных металлических и неметаллических изделий позволяет резко сократить время экспозиции и улучшить выявляемость дефектов. Нали-

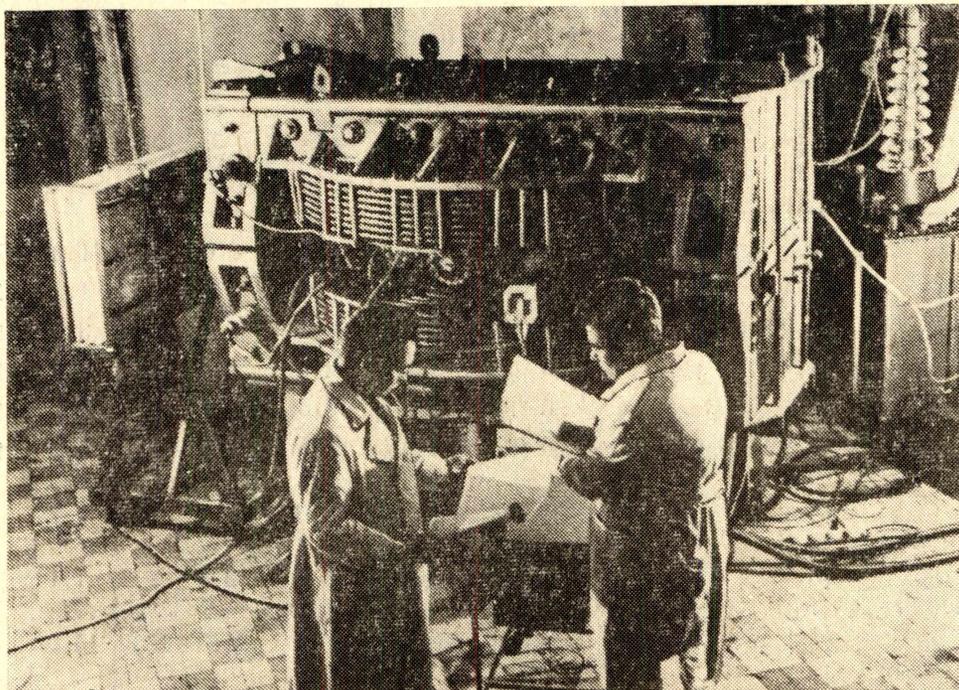


Рис. 1

чие у стереобетатронов двух перекрещивающихся пучков тормозного излучения оказывается весьма полезным как для целей дефектоскопии, так и для глубинной терапии при лечении злокачественных опухолей.

В Томске впервые в Советском Союзе был применен бетатрон для лечения злокачественных опухолей с предшествующим исследованием биологического действия высокоэнергетического тормозного излучения в эксперименте.

Томскими медиками под общим руководством профессора И. В. Торопцева была дана систематика морфологических изменений в органах и тканях экспериментальных животных, подвергающихся действию тормозного излучения бетатронов на различные энергии с широким диапазоном доз в условиях однократных и повторных облучений.

Широкое развитие строительства в нашей стране и связанная с этим насущная необходимость проведения качества контроля выполняемых работ обуславливают создание и развитие новых переносных дефектоскопов. На строительномонтажных площадках, стапелях, в полевых и цеховых условиях в настоящее время дефектоскопии наиболее часто используются радиоактивные источники излучения. Однако эти излучатели имеют малый коэффициент использования, требуют специальных хранилищ, при средних и больших активностях имеют значительные габариты и вес контейнеров и представляют серьезную постоянную радиационную опасность для операторов и окружающих.

В связи с отмеченными недостатками изотопных излучателей в Томском политехническом институте уже в течение нескольких лет ведется разработка специальных конструкций бетатронов, предназначенных для проведения контроля в указанных выше нестационарных условиях. В результате этих работ созданы переносные бетатроны на энергии излучения 3—6 Мэв, способные успешно конкурировать с большинством изотопных установок, обеспечивая более высокую выявляемость дефектов и позволяя контролировать изделия больших толщин.

Разработанные переносные малогабаритные бетатроны [32—34] выполняются в виде трех или четырех отдельных блоков, соединяемых при работе кабелями. Вес и габариты блоков позволяют осуществлять их ручную транспортировку к труднодоступным объектам контроля.

Производственные испытания опытных образцов переносных бетатронов выявили их высокую эффективность и обусловили широкую заинтересованность в этих установках промышленных предприятий.

На рис. 2 приведена фотография малогабаритного бетатрона ПМБ-6с, который позволяет контролировать стальные изделия толщиной до 250 мм и бетонные — до 600 мм. Время просвечивания стали

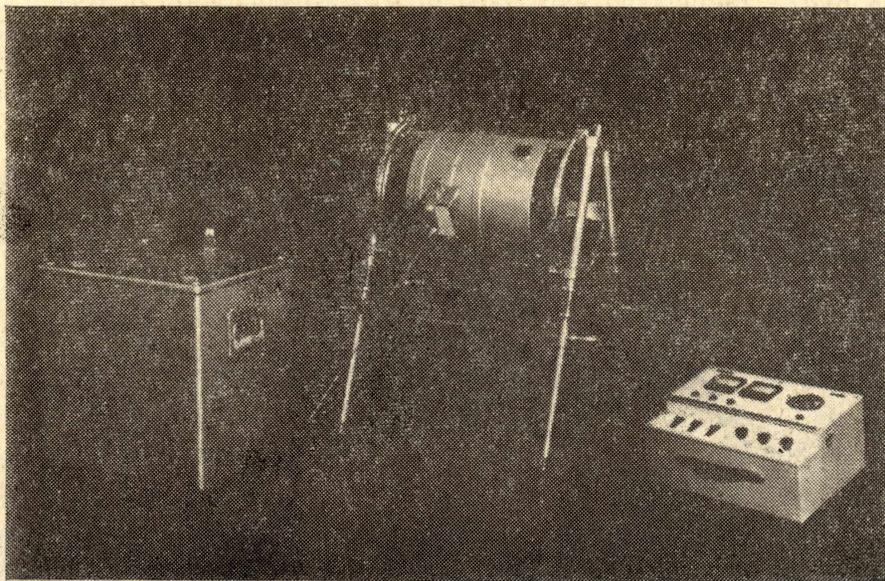


Рис. 2

толщиной 250 мм составляет 45 минут с чувствительностью около 1%.

Разработанный в институте бетатрон ПМБ-6с совместно с промышленными предприятиями Томска подготовлен для серийного выпуска. Конструкции этого бетатрона экспонировались на международных ярмарках в Вене (1968 г.), в Лейпциге (1969 г.), где были проданы со стендов. Один из бетатронов по заказу фирмы поставлен во Францию. В июле 1969 года бетатрон ПМБ-6с демонстрировался на Международной выставке сварочного оборудования в Японии.

В НИИ ЯФ ТПИ разработаны два типа микротронов [35—38], характеристики которых приведены в табл. 2.

Микротроны разрабатывались как инжекторы для синхротрона на 1,5 Гэв. Синхротрон работает с частотой 1—2 гц, поэтому и частота повторения импульсов микротронов равна также 1—2 гц. Частоту повторения импульсов микротронов можно увеличить до 50 или 400 гц,

что позволит получать среднее значение токов ускоренных электронов до 7,5 или 600 мка соответственно.

Таблица 2

Основные характеристики микротронов, разработанных в НИИ ЯФ ТПИ

№ микротронов	Полная энергия ускоренных электронов, Мэв	Число орбит	Максимальное значение тока на последней орбите, ма	Длительность импульса тока, мксек	Частота повторения импульсов, гц	Тип магнитопровода	Высота междуполосного зазора, мм	Напряженность магнитного поля в зазоре, э	Вес магнита, кг	Вес обмотки, кг	Потребляемая мощность, кВт	Год ввода в эксплуатацию
1	5,5	9	50	8	1—2	Ш-образный	125	1070	1700	190	10	1963
2	7,0	12	50	3	1—2	Четырехстоечный	106	1070	2430	250	4	1967

На рис. 3 приведена фотография микротрона на 7,0 Мэв.

В НИИ ЯФ ТПИ разрабатываются ускорители прямого действия. Вначале ускорители прямого действия разрабатывались как инжекторы электронов в циклические ускорители — бетатроны и синхротроны.

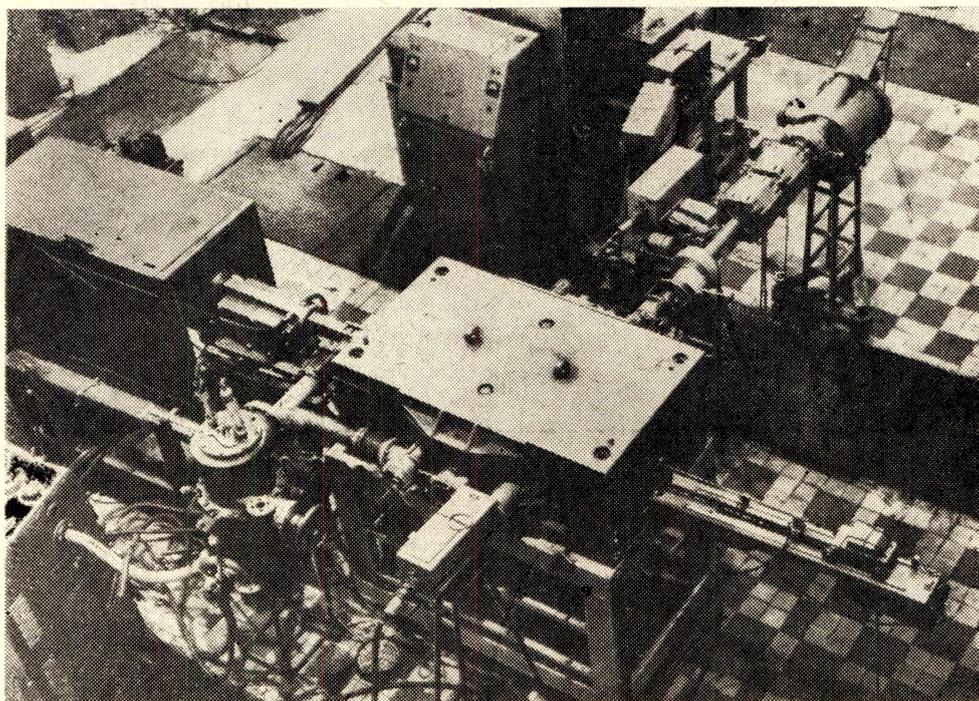


Рис. 3

Впоследствии появилась необходимость создания ускорителей прямого действия на энергии 200—700 Кэв как самостоятельных установок для использования в различных областях науки и техники таких, как квантовая электроника, радиационная химия, медицина и др.

В табл. 3 приведены основные характеристики сильноточного высоковольтного ускорителя СВУ-1. Конструктивно ускоритель скомпонован в два передвижных блока — блок излучателя и пульт управления.

В блоке излучателя размещены импульсный трансформатор, электронная пушка и вакуумная система со схемой ее питания. Габариты блока излучателя  $880 \times 850 \times 1070$  мм<sup>3</sup>, его вес 200 кг. В пульте управления расположены модулятор с выпрямителем и все приборы контроля и управления. Габариты пульта управления  $900 \times 1200 \times 1300$  мм<sup>3</sup>, вес 200 кг.

Получение вакуума в электронной пушке и ускорительной трубке ускорителя СВУ-1, так же как и в вакуумных камерах бетатронов ТПИ, осуществляется малогабаритными титановыми ионно-сорбиционными насосами, разработанными в институте.

Ускоритель СВУ-1 в 1966 году экспонировался на ВДНХ, где отмечен серебряной медалью. В 1967 году он экспонировался на советской выставке в г. Будапеште.

Для исследований в области квантовой электроники разработан наносекундный ускоритель электронов со следующими параметрами: энергия ускоренных электронов до 500 Кэв, ток электронов в импульсе до 1500 а, длительность импульса тока 30—40 нсек.

В Томском политехническом институте А. А. Воробьевым предложены [39—40] и под руководством А. А. Воробьева и А. Н. Диденко разработаны [41—42] волноводные синхротроны, сочетающие в себе достоинства линейных волноводных и циклических ускорителей. Будучи волноводными ускорителями, они обеспечивают большие приросты энергии на единицу длины. Будучи циклическими, они позволяют ускорять частицы до больших энергий при сравнительно небольшой длине волновода.

Конструктивно высокочастотная система волноводных синхротронов представляет собой какую-либо замедляющую изогнутую, замкнутую в кольцо систему, размещенную в междуполосном пространстве обычного синхротрона. Замедляющая система необходима для того, чтобы снижать фазовую скорость одной из волн до скорости частиц (в случае электронов до скорости света) и таким образом создать условие для непрерывного ускорения частиц.

С целью подтверждения основных теоретических положений в НИИ ЯФ ТПИ в 1963 и 1964 годах сооружены и запущены два волноводных циклических ускорителя электронов на 10 Мэв, один с ускоряющей системой в виде изогнутого волновода прямоугольного сечения диафрагмированного по внешней изогнутой стенке и другой — с ускоряющей системой в виде гладкого изогнутого замкнутого волновода. В обоих ускорителях предварительно электроны ускоряются до энергии 3 Мэв в бетатронном режиме.

Волноводные ускоряющие системы являются одним из возможных вариантов при разработке электронных и протонных ускорителей на сверхвысокие энергии. Эффективность таких систем сильно возрастает если апертура ускорительной камеры уменьшается, как это имеет место в кибернетических ускорителях, разрабатываемых под руководством академика Минца А. Л.

В НИИ ЯФ ТПИ разработан, сооружен и введен в эксплуатацию один из наиболее мощных циклических электронных ускорителей

Таблица 3  
Основные параметры СВУ—1.

Энергия ускоренных электронов, Кэв	Максимальное значение тока	Длительность импульса, мксек	Частота повторения импульсов, гц	Потребляемая мощность, кВт
200	10	3	50	3

в нашей стране — электронный синхротрон «Сириус» на энергию 1,5 ГэВ [43—50].

На синхротроне проведен большой объем научных исследований и получены интересные результаты о влиянии квантовых флуктуаций излучения электронов на их движение в камере ускорителя. Ценные результаты получены по физике элементарных частиц.

В Томском политехническом институте проводятся теоретические и экспериментальные исследования по новым методам ускорения заряженных частиц и по разработке новых типов ускорителей [51—57].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Родимов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 3, 1957.
2. П. А. Черданцев. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 41, 1957.
3. М. Ф. Филиппов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 77, 1957.
4. М. Ф. Филиппов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 87, 1957.
5. И. Г. Лещенко. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 130, 1957.
6. Б. Н. Родимов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 11, 1957.
7. И. П. Чучалин. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 256, 1957.
8. П. А. Черданцев. Изв. вузов СССР, «Физика», № 6, 177, 1959.
9. П. А. Черданцев. Труды III межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, изд-во ТГУ, стр. 58, 1961.
10. П. А. Черданцев. Труды IV межвузовской конференции по электронным ускорителям. М., «Высшая школа», стр. 419, 1964.
11. О. В. Соколов. Труды III межвузовской конференции по электронным ускорителям. Томск, изд-во ТГУ, стр. 69, 1961.
12. Л. С. Соколов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 307, 1957.
13. Б. А. Кононов. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 322, 1957.
14. А. А. Vогоbiev, L. S. Sokolov. Nucl. Instr., **4**, 173, 1959.
15. Е. М. Васильев, Б. А. Кононов. Труды III межвузовской конференции по ускорителям, Томск, изд-во ТГУ, стр. 167, 1961.
16. С. С. Кулюкин. Труды IV межвузовской конференции по электронным ускорителям. М., «Высшая школа», стр. 452, 1964.
17. И. П. Чучалин, В. М. Разин. «Электричество», № 9, 39, 1957.
18. В. М. Разин. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 164, 1957.
19. В. М. Разин. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 206, 1957.
20. Е. М. Белов и др. Изв. Томск. политехн. ин-та, **138**, 5, 1965.
21. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Индукционный ускоритель электронов — бетатрон. М., Атомиздат, 1961.
22. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Бетатрон и его применение. Томск, 1962.
23. А. А. Воробьев и др. Бетатронная дефектоскопия материалов и изделий. М., Атомиздат, 1965.
24. В. И. Горбунов, А. В. Покровский. Дефектоскопия, № 5, 1965.
25. А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Новые бетатроны и их использование для промышленной дефектоскопии, ЦИТЭИ, вып. 22, 1961.
26. А. А. Воробьев и др. Использование бетатронов в дефектоскопии. ОНТИ прибор, М., 1964.
27. В. А. Москалев. ЖТФ, **26**, 2060, 1956.
28. В. А. Москалев и др. Изв. вузов СССР, «Физика» № 5, 35, 1959.
29. А. А. Vогоbiev, V. A. Moskalev. Zeitschrift, **4**, 501, 1964.
30. В. А. Москалев и др. Электронные ускорители. Труды V межвузовской конференции. М., Атомиздат, стр. 112, 1966.
31. А. А. Воробьев и др. Изв. вузов СССР, «Физика», № 3, 68, 1967.
32. Л. М. Ананьев и др. Малогабаритные бетатроны, ГОСИНТИ, 10, вып. 14, 1963.
33. Л. А. Ананьев и др. Труды IV межвузовской конференции по электронным ускорителям. М., «Высшая школа», 180, 1964.
34. Л. М. Ананьев, В. А. Чахлов, М. М. Штейн, Ю. П. Ярушкин. Дефектоскопия, № 5, 60, 1968.
35. Б. З. Кантер. Изв. вузов СССР, «Физика», № 3, 138, 1960.
36. Б. З. Кантер и др. Изв. Томск. политехн. ин-та, **122**, 45, 1962.
37. Б. З. Кантер, Ю. Г. Юшков. «ПТЭ», № 4, 28, 1964.
38. В. А. Визирь и др. Труды VI конференции по электронным ускорителям. Изд-во «Энергия», 176, 1968.
39. А. А. Воробьев, Г. В. Кривошеков. Изв. Томск. политехн. ин-та, **87**, 358, 1957.

40. А. А. Воробьев. Изв. вузов СССР. «Электромеханика», 1, № 5, 106, 1958.
41. А. А. Воробьев и др. Труды международной конференции по ускорителям, ЦЕРН, Женева, 681, 1959.
42. А. А. Воробьев и др. Волноводные синхротроны. Атомиздат, М., 1966.
43. А. А. Воробьев, И. П. Чучалин. «Вестник высшей школы», № 11, 57, 1966.
44. А. А. Воробьев и др. Атомная энергия, 21, 435, 1966.
45. А. А. Воробьев и др. Изв. вузов СССР, «Физика», № 2, 162, 1967.
46. И. П. Чучалин. «Природа», № 2, 50, 1968.
47. А. А. Воробьев, И. П. Чучалин, А. Г. Власов и др. Синхротрон ТПИ на 1,5 Гэв, Атомиздат, 1968.
48. А. А. Воробьев и др. Труды VI межвузовской конференции по электронным ускорителям. М., «Энергия», 110, 1968.
49. А. А. Vorobiev, M. N. Volkov et al. Nucl. Instrum. and Methods, 66, 321, 1968.
50. В. А. Визирь и др. ЖТФ, 39, в. 6, 982, 1969.
51. Б. Н. Родимов, Т. А. Медведева. Изв. вузов СССР, «Физика», № 4, 147, 1958.
52. Б. Н. Родимов. «Атомная энергия», 6, № 2, 200, 1959.
53. Б. Н. Родимов. «Атомная энергия», № 12, 240, 1962.
54. Г. А. Куницын, В. И. Горбунов, Ю. А. Отрубянников. Труды IV межвузовской конференции по электронным ускорителям. М., «Высшая школа», 185, 1964.
55. В. А. Москалев. ЖТФ, 35, в. 4, 1965.
56. А. А. Воробьев и др. «Атомная энергия», 22, в. 1, 3, 1967.
57. Р. Г. Зиякаев, Г. П. Фоменко, И. П. Чучалин, Ю. Г. Юшков. Письма в ЖЭТФ, 15, в. 6, 31, 1972.