

Студенты кафедры активно занимаются научно-исследовательской работой. Результаты ее широко освещаются в печати, демонстрируются на отечественных и зарубежных выставках. Тематика научных исследований включает широкий круг проблем в области неразрушающего контроля и диагностики веществ, материалов, изделий, окружающей среды.

С 1993 г. кафедра перешла на 3-х уровневую систему образования и выпускает бакалавров, инженеров и магистров. Подготовка инженеров ведется по всем направлениям кафедры, а выпускники-магистры готовятся для научно-исследовательской и преподавательской деятельности.

Крепнут и ширятся связи кафедры с вузами и предприятиями РФ, ближнего и дальнего зарубежья. Выпускники успешно работают по специальности в ФРГ, Казахстане, Узбекистане, на Украине и в Белоруссии. Ими открываются и формируются службы качества на предприятиях. Они каждый год пополняют ряды аспирантов ТПУ. В 1997 г. 2 выпускника кафедры проходили годичную стажировку и дипломирование в Германии и получили 2 диплома о высшем образовании (российский и немецкий). На кафедре готовятся три докторских диссертации. Кафедра гарантирует распределение всем выпускникам, успешно прошедшим обучение, на преуспевающие предприятия. Спрос на наших специалистов растет. Активное участие в распределении принимают студенты через свою организацию "Союз обеспокоенных студентов" (SOS).

XXI век – век новой культуры – культуры качества. Кафедра ФМПК ТПУ совместно с НИИ интроскопии является хорошей базой для подготовки менеджеров по качеству.

УДК 621.384.634

В. Я. ГОНЧАРОВ, В. А. МОСКАЛЕВ, В. Л. НИКОЛАЕВ, Г. И. СЕРГЕЕВ,
А. В. ЦИМБАЛИСТ, В. В. ШАШОВ, В. Г. ШЕСТАКОВ

070

СИЛЬНОТОЧНЫЕ БЕТАТРОНЫ И СТЕРЕОБЕТАТРОНЫ

В статье обобщены результаты многолетних работ по созданию сильноточных бетатронов, начатых в НИИ ядерной физики ТПИ, а затем продолженных в НИИ интроскопии Томского политехнического университета. Приведены характерные особенности и технические характеристики разработанного для промышленного применения ряда сильноточных бетатронов и стереобетатронов на энергии от 15 до 50 МэВ. Описаны области их практического использования. Рассмотрены варианты новых разработок и возможные сферы их применения.

Введение

Проблема повышения тока ускоренных частиц и интенсивности излучения ускорителей заряженных частиц является наиболее актуальной и входит в область интересов практически любой ускорительной лаборатории.

Работы по созданию высокоинтенсивных бетатронов, названных позднее сильноточными, начались в 1957 г., когда перед разработчиками была поставлена задача повысить число ускоряемых в бетатроне электронов на несколько порядков (до 1000 раз) относительно существовавших в то время индукционных ускорителей. Увеличение числа ускоряемых частиц даже в два-три раза представляет серьезную проблему, при решении которой встречаются определенные трудности технического характера. Задача же увеличения тока ускоренных частиц на два-три порядка значительно сложнее. Она потребовала теоретической проработки вопроса и привела к качественным изменениям всего ускорителя в целом.

Сильноточные бетатроны

Увеличение тока заряженных частиц в бетатроне может быть достигнуто существенным изменением ряда основных параметров ускорителя:

1. Увеличением области фокусирующих сил управляющего магнитного поля бетатрона и, соответственно, практическое осуществление такого магнитного поля, которое было бы способно удерживать на орбите необходимый электронный заряд до конца цикла ускорения. Кроме того, большой циркулирующий ток электронов создает достаточно сильное собственное магнитное поле, которое также должно быть учтено при расчете бетатрона.

2. Значительным увеличением количества электронов, вводимых в ускорительную камеру для обеспечения расчетного циркулирующего тока. Основная трудность здесь состояла в разработке источника электронов, способного обеспечить большие токи эмиссии при минимальных размерах рабочей поверхности эмиттера и при условии высокой стабильности и большого срока службы источника.

3. Значительным увеличением начальной энергии электронов, при которой они вводятся в ускорение, для обеспечения оптимальных условий захвата в ускорение необходимого числа электронов.

4. Изменением условий захвата электронов в ускорение, способного привести к увеличению захваченного и доведенного до конца цикла ускорения числа электронов.

Увеличение объема магнитного поля бетатрона связано с увеличением либо геометрических размеров межполюсного пространства, либо радиуса равновесной орбиты. И то и другое приводит к резкому возрастанию габаритов и веса ускорителя и росту потребляемой электрической энергии. Поэтому увеличение межполюсного пространства бетатрона необходимо было ограничить разумными пределами. Снижение размеров межполюсного пространства при заданном электронном заряде Q можно получить путем увеличения плотности заряда ρ_0 в момент его ввода в зону действия фокусирующих сил. Повысить ρ_0 при заданном Q можно только увеличением фокусирующих сил управляющего магнитного поля. Но поскольку силы, действующие на пучок со стороны магнитного поля, пропорциональны напряженности H магнитного поля, то для увеличения Q следует вводить электроны в камеру при больших H , т.е. при большей энергии инжектируемых электронов.

Теоретические вопросы получения управляющего поля сильноточных бетатронов были разработаны Б.Н.Родимовым и П.А.Черданцевым [1]. Ими же была выведена формула для максимального равновесного заряда пучка

$$Q = \frac{E}{2eR_0} \left[\left(\frac{E}{E_0} \right)^2 - 1 \right] S_0, \quad (1)$$

где E и E_0 – энергия инжектируемых и энергия покоя электронов; S_0 – площадь сечения зоны равновесного пучка; e – заряд электрона и R_0 – радиус равновесной орбиты.

Из этой формулы следует, что напряжение инжекции не имеет оптимального значения для получения максимального тока ускоренных частиц. Реальная конечная величина тока определяется пределом по пространственному заряду, имеющему конкретное значение для заданного E . С ростом E этот предел сдвигается в сторону больших Q . Поэтому предел инжекции определяется только техническими и экономическими соображениями.

Учитывая это, было признано целесообразным увеличить область действия фокусирующих сил, т.е. емкость магнитного поля ускорителя приблизительно в десять раз или несколько больше, а дальнейшее увеличение ускоряемого заряда получить в результате повышения напряжения инжекции до нескольких сот киловольт. Такое соотношение остается оптимальным и в настоящее время. Увеличение напряжения инжекции желательно и для снижения вероятности смещения рабочей точки от заданного значения к ближайшему опасному резонансу. Изменение эффективного значения показателя спада магнитного поля на величину dn , вызываемое пространственным зарядом Q пучка, определяется соотношением

$$dn = \frac{QeR_0c^2}{4\pi a^2 E} \left(\frac{1-\beta^2}{\beta} \right), \quad (2)$$

где a – радиус пучка; β – скорость частиц в единицах скорости света; R_0 – радиус равновесной орбиты. Из этого выражения ясно, что с увеличением энергии инжектируемых частиц E пропорционально уменьшается сдвиг рабочей точки dn ускорителя от заданного значения.

Для сильноточных бетатронов были разработаны специальные высоковольтные инжекторные устройства в виде торцевых электронных пушек с инфлектором, которые позволяли получать электронные пучки с энергией от 200 до 400 кэВ при электронном токе 30–50 А длительностью от двух до четырех микросекунд с угловой расходимостью порядка 1–25°.

При экспериментальном исследовании процесса ускорения пучка электронов уже в первом сооруженном ускорителе было обнаружено явление поперечной неустойчивости циркулирующего электронного пучка, которое возникало в сформировавшемся пучке спустя значительное время после окончания процесса инжекции и выражалось в периодическом возрастании амплитуды вертикальных колебаний на радиусе равновесной орбиты до вертикального размера ускорительной камеры. Таким образом, впервые при создании бетатронов был достигнут предельный ток электронов, составляющий до $(2-3) \cdot 10^{12}$ частиц/импульс, который может быть ускорен при заданных параметрах магнитного поля

ускорителя. Предельный ток ограничивается возникновением поперечной неустойчивости пучка, обусловленной взаимодействием пучка с проводящим покрытием стенок камеры. Увеличение числа захваченных в ускорение частиц не приводит поэтому к увеличению числа частиц, доводимых до конца цикла ускорения, и, следовательно, не увеличивает мощность дозы тормозного излучения. После объяснения данного явления за разрабатываемой серией бетатронов этого направления укрепилось название "сильноточные бетатроны".

Стереобетатроны

Во многих случаях практического применения бетатронов возникает необходимость облучения объекта с двух отдельных точек с раздельным расположением входных и выходных полей облучения. Например, при дефектоскопии толстостенных материалов необходимо обнаружить не только наличие дефекта, но и определить его место расположения в толще материала. В клинической медицине двухпольное облучение при пересечении пучков на опухоли позволяет существенно снизить степень облучения здоровых тканей.

Бетатроны с коротким импульсом излучения (0,1–0,2) мкс можно применять для импульсной радиографии быстропротекающих процессов и быстро движущихся объектов. Перемещение объекта на расстояние 0,1–1,0 мм за время экспозиции 0,1 мкс соответствует скорости перемещения от 10^3 до 10^4 км/час. Облучение объекта с двух отдельных точек позволяет получить стереоизображение детали, движущейся в закрытом объеме, недоступном оптическому наблюдению. При изучении динамики быстропротекающего процесса импульсы излучения, выходящие из двух разных точек, сдвигаются по фазе на некоторый регулируемый угол. В этом случае получают два снимка, соответствующие двум конкретным стадиям развития процесса во времени.

Для обеспечения такого способа облучения была предложена и разработана оригинальная конструкция индукционного ускорителя – двухкамерный стереобетатрон. Он генерирует одновременно два скрещивающихся пучка излучения с расстоянием между источниками свыше 100 см, что обеспечивает хорошо выраженную стереоскопичность получаемых снимков. Отличительная особенность такого бетатрона – общий магнитный поток для двух ускорительных систем. В мировой практике стереобетатрон аналогов не имеет.

Ниже приведены основные технические характеристики некоторых сильноточных бетатронов:

Параметры	СБС-15	КБС-25	БС-50
Максимальная энергия, МэВ	15	25	50
Мощность дозы тормозного излучения на расстоянии 1 м от мишени, Гр/мин	4×2	30	220
Пределы плавного регулирования энергии излучения, МэВ	–	4–30	5–50
Частота следования импульсов излучения	50	100	50
Длительность импульса тормозного излучения, мкс	5–20	5–20	10–20
Потребляемая мощность, кВт	20	60	80
Масса излучателя, т	4	3,6	11
Габариты излучателя, м	1,9×1,0×1,1	1,6×1,6×0,8	2,5×2,5×2,5

Бетатрон СБС-15 [2] разрабатывался для исследования быстропротекающих процессов и был выполнен в стереоварианте.

На базе ускорителя КБС-25 [3] была создана мобильная бетатронная установка для радиационной визуализации динамических процессов и дефектоскопии в полевых условиях. Излучатель, схемы питания и контроля размещены в перевозимом отапливаемом стальном боксе объемом $6 \times 3 \times 2,5$ м³. Полная масса бокса с оборудованием 20 т. Для наблюдения за технологическими процессами используются флюоресцентные экраны большого размера, изображение с которых с помощью кинокамеры и видеотелевизионной аппаратуры регистрируется на пленку и магнитную ленту.

На основе бетатрона БС-50 [4] создана автоматизированная лаборатория активационного анализа. Ускорительная камера бетатрона оборудована специальным "карманом" для внутрикамерного облучения образцов большими дозами. Транспортировка образцов от ускорителя в лабораторию осуществляется пневмопочтой.

Перспективные разработки

Цилиндрический бетатрон. Критический заряд Q в бетатронах на уровне инженерии прямо пропорционален поперечному сечению S ускорительной камеры, обратно пропорционален ра-

диусу равновесной орбиты R_0 и в целом определяется выражением (1). Радиус равновесной орбиты R_0 определяется максимальной энергией ускоренных электронов E и максимальной индукцией магнитного поля B_{0m} и произвольно уменьшен быть не может. Зато поперечное сечение ускорительной камеры S не имеет такого ограничения и, в принципе, может быть достаточно большим.

Большое сечение ускорительной камеры является одной из характерных отличительных особенностей индукционных циклических ускорителей, рассчитанных на ускорение и удержание больших токов. Увеличение области устойчивого движения электронов обычно получают путем увеличения как радиального, так и аксиального размеров сечения пучка. Но увеличение радиального размера сечения ускорительной камеры вызывает соответствующий рост радиуса равновесной орбиты R_0 и, в соответствии с (1), уменьшает критический заряд Q . Поэтому представляется целесообразным увеличение сечения ускорительной камеры S только за счет аксиального ее размера, что приводит к цилиндрической конструкции бетатрона.

В рабочем зазоре цилиндрического бетатрона формируется магнитное поле типа открытой пробочной ловушки, причем в большей части зазора показатель спада магнитного поля $n = 0$. Ускорение электронного пучка и его радиальная фокусировка осуществляются так же, как и в обычном бетатроне, а вертикальный размер пучка задается расположением магнитных пробок. Электронный пучок в таком бетатроне в процессе ускорения стягивается не в кольцо, как в обычном бетатроне, а в цилиндр, поэтому объемная плотность электронного заряда в сформировавшемся пучке должна быть меньшей.

Проведенные экспериментальные и теоретические работы показали, что ускоритель такого типа обладает следующими преимуществами:

1. Фокусирующие силы магнитного поля в цилиндрическом бетатроне сильнее (за счет $n = 0$ в рабочей зоне).
2. Рациональнее используется объем ускорительной камеры.
3. Надорбитная установка инжектора улучшает условия захвата электронов в ускорение и позволяет увеличить время инжекции.
4. По сравнению с обычными и сильноточными бетатронами в цилиндрическом бетатроне улучшаются удельные характеристики (отношение ускоряемого заряда к массе ускорителя и потребляемая мощность на единицу заряда).

Для более детального исследования характеристик ускорителя рассматриваемого типа был разработан, изготовлен и запущен на излучение экспериментальный образец цилиндрического бетатрона на энергию 30 МэВ [5]. При проведении опытно-конструкторских работ были отработаны методика расчета ускорителя и, что особенно важно, методы компьютерного моделирования нестационарных процессов инжекции, захвата в ускорение и динамики электронного пучка. Моделирование проводилось с учетом как взаимодействия частиц, так и с учетом собственного электромагнитного поля пучка. При энергии инжектируемых электронов 50 кэВ до конца цикла ускорения доводился заряд $3 \cdot 10^{11}$ электр./цикл. Этот результат близок к предельному для выбранных параметров ускорителя. В настоящее время проведена модернизация ускорителя.

Высокоэнергетичный ускоритель. В 80-х гг., когда была поставлена задача по ускорению килоамперных токов и достижению средней мощности пучка от сотен киловатт до десятков мегаватт, начался новый этап в развитии бетатроностроения. Для ускорения токов порядка тысяч ампер требуется низкоимпедансный метод ускорения. Индукционный метод ускорения, который используется в бетатронах, принципиально низкоимпедансный и лучше подходит для ускорения килоамперных токов, чем резонансный высокочастотный метод.

Была проведена оценка основных параметров бетатрона на 500 МэВ на основе предложенного и разработанного в НИИ интроскопии способа компенсации потерь энергии на синхротронное излучение [6]. В качестве магнитной системы такого бетатрона выбрана система ведущего поля слабофокусирующего синхротрона, модифицированная с учетом последних достижений по ускорению килоамперных токов введением тороидального и стеллараторного магнитных полей. В связи с огромной мощностью ускорителя для питания электромагнита использован генератор импульсов тока на основе ударного генератора с индуктивным накопителем.

Проведенные расчеты показали, что средний радиус такого ускорителя составит (с учетом промежутков под индукторами) $(2,19 \pm 0,01)$ м. Диаметр излучателя – 7,58 м, а его высота, определяемая индукторами, – 3,2 м. Масса управляющих магнитов – 55 т, а масса шести индукторов – 181 т.

Следует отметить уникальные параметры пучка. Энергия, приобретаемая пучком за один цикл ускорения, составит 20 кДж. При работе такого ускорителя с периодичностью 50 циклов в секунду средняя мощность пучка составит 1 МВт. КПД ускорителя оценивается примерно в 80%.

Области применения сильноточных бетатронов

Дефектоскопия. Исследования по определению чувствительности и производительности контроля проводились в диапазоне энергий 25–45 МэВ. В качестве объекта контроля использовалась сталь. В процессе экспериментов варьировались энергия излучения, толщина слоя стали, фокусное расстояние, рентгенпленки. При съемке использовались свинцовые усиливающие экраны.

За время 1 ч при энергии 25 МэВ и фокусном расстоянии 2 м сильноточные бетатроны позволяют просвечивать слой стали толщиной 280–340 мм при использовании пленок РТ-5, Д4, Х-5 и Д7. При энергии 45 МэВ и фокусном расстоянии 3 м стальной барьер толщиной 500 мм можно просветить на пленку РТ-1 менее чем за 7 мин. При экспозиции в 1 ч и этом же фокусном расстоянии бетатрон дает возможность просветить на пленку РТ-5 слой стали толщиной 500 мм, а на пленку РТ-1 – почти 700 мм.

Для определения размеров выявляемого дефекта применялись дефектометры из материала контролируемого образца. В рассматриваемом диапазоне толщин выявляемость дефекта определяется величиной от 0,25 до 1% толщины просвечиваемого слоя стали.

Отличительной чертой бетатронов являются очень малые размеры "фокусного пятна", образуемого на мишени ускорителя сбрасываемым на нее электронным пучком. Для сильноточных бетатронов размеры источника тормозного излучения не превышают 1 мм², что определяет высокую четкость рентгеновских снимков дефектоскопируемых объектов.

Активационный анализ. Существенным преимуществом бетатрона для активационного анализа является плавная регулировка энергии излучения практически от нуля до максимальной. Монохроматичность пучка ускоренных электронов обеспечивает требуемый спектр тормозных квантов вблизи граничной энергии, что позволяет получать высокие уровни наведенной активности в облучаемых пробах.

Для определения содержания химических элементов в образцах используются методы фотонной и (при наличии конвертора) нейтронной активации. Как правило активационный анализ производится по короткоживущим нуклидам. Продолжительность анализа составляет 1–10 мин в зависимости от уровня содержания определенной компоненты. Затраты времени на проведение одного анализа не превышают периода полураспада исследуемого радионуклида.

Сильноточные бетатроны с энергией 30 МэВ и током до 10 мкА позволяют проводить анализ материалов, включающих практически все элементы периодической таблицы Менделеева, с пределами обнаружения содержания (10^{-4} – 10^{-5})% масс.

В отличие от ядерных реакторов и мощных изотопных источников бетатрон экологически безопасен.

Электронные пучки. Электронный пучок с помощью специальных устройств был выведен из сильноточного бетатрона на 25 МэВ [7]. Размеры поперечного сечения пучка на расстоянии 30 см от выводного окна составляют 10 см², а плотность потока электронов – $9 \cdot 10^{11}$ частиц/см²·с. Такой пучок можно использовать для исследования механизмов радиационно-химических превращений и процессов, происходящих в местах высокой концентрации радикальных продуктов импульсного радиолиза, где реакции заканчиваются за время 10^{-9} – 10^{-8} с.

В бетатроне БС-50 при использовании простейшей системы вывода получен электронный пучок до 10^{12} эл./с (3% от тока пучка на мишень).

Заключение

Сильноточные бетатроны и стереобетатроны на различные энергии (вплоть до 50 МэВ) по интенсивности излучения вполне сопоставимы с микротронами и линейными ускорителями на ту же энергию, хотя значительно проще их по конструкции и удобнее в эксплуатации из-за отсутствия высокочастотных систем. Благодаря высоким параметрам излучения сильноточные бетатроны многократно экспонировались институтом на многих международных технических выставках и ВДНХ СССР, где всегда получали положительные отзывы и почетные награды.

Сильноточные бетатроны Томского политехнического университета были установлены на промышленных предприятиях и в научных учреждениях Ленинграда, Челябинска, Бийска, Ташкента и других городов России.

Теоретические, опытно-конструкторские и экспериментальные результаты, связанные с созданием сильноточных бетатронов, обобщены в докторской диссертации В.А.Москалева, в монографиях [8–10], в кандидатских диссертациях В.Г.Шестакова, Б.В.Окулова, Ю.М.Скворцова, В.Н.Кудрявченко, В.В.Шашова, В.Я.Гончарова, Г.И.Сергеева, Ю.А.Громова, В.В.Васильева и др. Изложению теории удержания больших токов посвящена докторская диссертация Б.Н.Родимова.

Активное участие в разработку отдельных узлов и блоков ускорителя принимали в разное время инженеры А.М.Слупский, Ю.В.Акимочкин, Ю.М.Акимов, Г.В.Милютин, В.Н.Бизенков, Ю.П.Суриков, Н.Е.Федосенко, А.Е.Ерзылев, Л.Т.Станислав и др.

Результаты исследований и разработок активно используются в учебном процессе Томского политехнического университета. В курсе общей физики включен раздел, посвященный электронным ускорителям, в лабораторном практикуме используется работа, моделирующая движение электронов в магнитном поле цилиндрического бетатрона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родимов Б.Н., Черданцев П.А., Медведева Т.А. // Известия вузов. Физика. – 1959. – №5. – С.6–13.
2. Москалев В.А., Гончаров В.Я., Окулов Б.В. и др. // Электронные ускорители. – М.: Энергия, 1968. – С.266–268.
3. Акулов Г.В., Богдашкин В.И., Москалев В.А. и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Электрофизическая аппаратура. – 1987. – Вып.23. – С.19–21.
4. Азимов А., Бабаджанов Р.Д., Москалев В.А. и др. // Прикладная ядерная спектроскопия. – 1979. – Вып.9.
5. Акимочкин Ю.В., Гончаров В.Я., Москалев В.А. и др. // Атомная энергия. – 1993. – Т.75. – Вып.3. – С.200–205.
6. Москалев В.А., Сергеев Г.И., Шестаков В.Г. // ЖТФ. – 1993. – Т.63. – Вып.8. – С.172–176.
7. Москалев В.А., Шашов В.В. // Доклады 2-го Всесоюзного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. – Л.: 1975. – Т.2. – С.376–381.
8. Воробьев А.А., Москалев В.А. Сильноточный бетатрон и стереобетатрон. – М.: Атомиздат, 1969.
9. Москалев В.А. Бетатроны. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
10. Москалев В.А., Сергеев Г.И. Измерение параметров пучков заряженных частиц. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

УДК 621.384.3

В. Г. ТОРГУНАКОВ

ЛИНЕЙНЫЕ СКАНИРУЮЩИЕ ИК-СИСТЕМЫ ТЕПЛОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Приведены результаты теоретико-экспериментального проектирования модульных индикационных сканирующих систем термографического контроля крупногабаритных промышленных теплоустановок.

Долговечность и безаварийность функционирования промышленных теплоустановок в значительной степени зависит от состояния защитного футеровочного слоя их оболочек. Дефекты, возникающие в теплозащитном слое, приводят к непроизводительным простоям, материальным и финансовым затратам на ремонт и последующий запуск технологического оборудования. В первую очередь это относится к объектам, подверженным кроме термического значительному механическому вибрационному воздействию (коксовые батареи, вращающиеся печи цементного и металлургического производств).

Отечественным приборостроением стационарные системы дистанционного непрерывного контроля корпусов промышленных теплоустановок серийно не выпускаются. Разработки, выполняемые в рамках НИР, основанные на использовании термпар, точечных пирометров с различного вида приводными механизмами сканирования, тепловизоров с охлаждаемыми приемниками излучения, по разным причинам (сложность в обслуживании, недостоверность, отсутствие наглядности, малый объем информации и т.д.) не нашли широкого применения.

Интерес представляют появившиеся в последние несколько лет опытные образцы стационарных сканирующих инфракрасных (ИК) систем для дефектоскопии корпуса и контроля состояния энергетических и геометрических параметров газового факела вращающихся печей обжига материалов в цементной промышленности. Например, "Пироскан" (Омск), "Термоскан-02" (Москва), "ИКСА-03Ц", "ИНТРОКОН-04" (Томск) [1], реализующие наглядные, графические, абстрактные и комбинированные модели исследуемых тепловых полей. Из зарубежных, для контроля динамических пространственных тепловых картин, наиболее широко известны линейные сканирующие системы ряда "Термопрофиль" шведской фирмы "AGEMA Infrared Systems".

В состав систем входят один ("Пироскан", "Термоскан-02", "Термопрофиль") или два ("ИКСА-03Ц", "ИНТРОКОН-04") линейных сканирующих пирометра, аппаратура связи, стандартные