

сообщения  
объединенного  
института  
ядерных  
исследований  
Дубна

4565/2-80

22/9-80  
P9-80-349

В.А.Швец

ДЕФЛЕКТОРНАЯ СЕКЦИЯ ЛИУ-30

1980

В работах<sup>/1,2/</sup> были определены условия монохроматизации, а в<sup>/3-7/</sup> описаны принципы действия системы формирования монохроматического пучка в сильноточной электронной пушке - инжекторе ускорителя ЛИУ-30.

Употребляемый здесь и ранее термин "монохроматизация электронного пучка" имеет в виду результат отделения и исключения из процесса ускорения неполноценных частиц на фронте и спаде импульса тока с помощью временного магнитного селектора с крутизной нарастания и спада поля до  $10^{11}$  Э/с.

Поставленная задача в условиях уже существующего проекта и сооружаемого ускорителя ЛИУ-30 предполагала разработку, создание, исследование и введение в промежуток между электронной пушкой и первой секцией ЛИУ быстродействующей магнитной отклоняющей системы с комплектом оборудования для синхронной работы. При этом отклоняющая система /система монохроматизации/ должна обладать следующими особенностями.

Аксиальная симметрия пучка электронов и всех элементов ЛИУ требует и аксиально-симметричной отклоняющей системы<sup>/1/</sup>. В ее состав помимо собственно отклоняющих элементов входят вакуумная система /камера, сифонные развязки и др./<sup>/2/</sup>, устройства для проводки пучка<sup>/7/</sup>, промежуток дрейфа для формирования пучка и т.д. Это ограничивает осевую протяженность отклоняющих элементов, так как разрабатываемое устройство должно войти в готовый ускоритель. Следовательно, необходимые импульсные тски, создающие магнитные поля отклонения, будут измеряться сотнями ампер<sup>/1,7/</sup>, так как в этих условиях возможно применение только одновиткового и малоиндуктивного элемента отклонения. Необходимость формирования моноэнергетического сгустка электронов влечет за собой наносекундные времена срабатывания импульсной системы<sup>/1/</sup>. Это требует применения в схеме формирования импульсов тока так называемых обострителей<sup>/2,6/</sup>. Высокая надежность и большая частота следования посылок в ЛИУ ограничивают рабочие напряжения обострителей. С этой точки зрения необходима разработка низкоимпедансных обострителей и схемы формирования импульсов в целом.

В этом сообщении приводятся результаты работы по созданию, испытаниям и исследованиям штатного экземпляра дефлекторной секции для ЛИУ-30, а также комплекса аппаратуры системы формирования монохроматического электронного пучка.



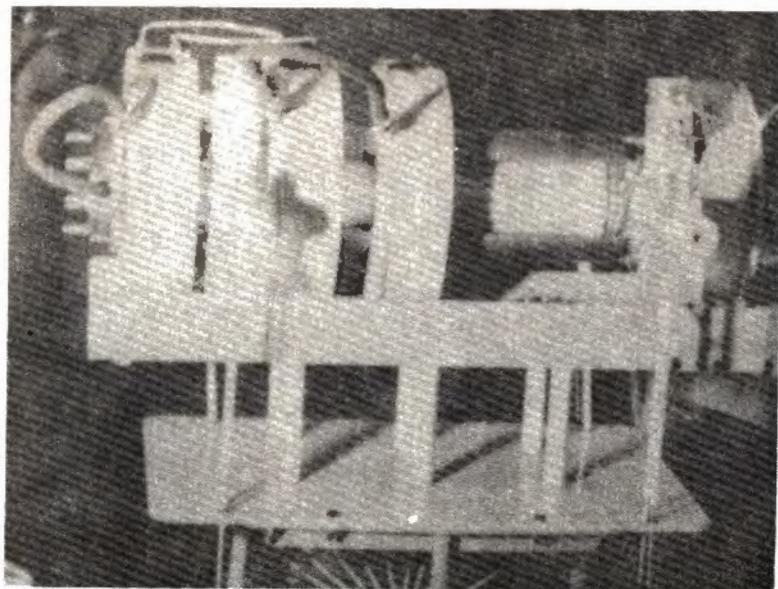


Рис.1. Дефлекторная секция ЛИУ-30.

Дефлекторная секция ЛИУ-30 /рис.1/, так же как и дефлекторная секция ЭЭП-2<sup>/7/</sup>, состоит из вакуумной камеры, собственно дефлекторов, расположенных на наружной ее поверхности, и водоохлаждаемого токоприемника, пропускающего внутрь камеры без ослабления магнитное поле отклонения, принимающего отклоняемые электроны и защищающего стенки камеры от разрушения этими электронами. Ранее уже отмечалось<sup>/7/</sup>, что функции отклонения и поглощения разделены между этими тремя элементами /камерой, дефлекторами и токоприемником, расположенным внутри камеры соосно с ней по всей ее длине/ из-за невозможности совмещения в одном элементе функций высоковольтного, сильноточного, охлаждаемого и согласованного в наносекундном диапазоне длительностей ввода импульсов монохроматизации. Вакуумная камера дефлекторной секции изготовлена из керамического изолятора /трубка от импульсного трансформатора ЛИУ-30/ с коваровыми манжетами, к которым приварены фланцы из нержавеющей стали. На торцах изолятора располагаются две сильфонные развязки, предназначенные для стыковки, с одной стороны, через проставочный патрубков с выходным фланцем электронной пушки, а с другой - через проточный фланец токоприемника - с первой ускорительной секцией ЛИУ. На наружной поверхности вакуумной камеры смонтированы

дефлекторы 1-го и 2-го каналов, состоящие из токопроводов /два полуцилиндра, отделенных продольным узким разрезом и соединенных с одного конца поперечной проводящей перемычкой<sup>/11/</sup>, коаксиальных экранов<sup>/2/</sup> и диэлектрических прокладок "дефлектор-экран" из высокопрочного стеклотекстолита<sup>/2/</sup>. Ввод импульсов в дефлекторы и их вывод происходят через коаксиальные разъемы с волновым сопротивлением  $3,5 \text{ Ом}^{/8/}$ ; этим же волновым сопротивлением обладают тракты формирования импульсов монохроматизации<sup>/8/</sup>, дефлекторы<sup>/2/</sup> и нагрузка<sup>/5/</sup>. Тракты формирования исходных импульсов состоят из специальных низкоомных формирующих линий /накопителей<sup>/3/</sup> с волновым сопротивлением  $1,25 \text{ Ом}$  и длительностью импульсов  $2,5$  и  $1 \text{ мкс}$ , многоканальных обострителей с  $\tau_{\text{фр.}} = 1 \text{ нс}$ ,  $I_y = 1,3 \text{ кА}$ ,  $\rho = 1,5 \text{ Ом}^{/6/}$ , а также стометровых отрезков кабелей РК-50-2-12, включенных параллельно по 32. Токоприемник отклоненных электронов выполнен по конструкции, описанной в работе<sup>/4/</sup>, его длина  $770 \text{ мм}$ , наружный и внутренний диаметры  $70$  и  $56 \text{ мм}$  соответственно, сечение каналов водоохлаждения увеличено вдвое, а сами пластины /элементы "гребенки"/ выполнены из нержавеющей стали. Это позволяет улучшить тепловой режим работы.

На наружной поверхности дефлектора первого канала смонтирован токовый корректор, предназначенный для уравнивания его остаточного поля. Остаточное магнитное поле  $/\approx 2-4\%$  от основного отклоняющего поля/ возникает из-за рассогласования /неполного сложения импульсов/ в схеме формирования первого канала, действие которого оканчивается крутым спадом перед началом вершины ускоряемого импульса электронов /рабочей части/, пропускаемой в ЛИУ-30 без отклонения.

Корректор имеет две секции по 6 витков провода  $\phi 2,44 \text{ мм}$ , уложенных в специальных стяжках равномерно по полуокружностям и параллельно соответствующим полупластинам дефлектора; переход от каждого витка одной секции на диаметрально противоположный виток другой секции корректора осуществляется под углом  $90^\circ$  по наружной поверхности дефлектора полукруглой частью витка-перемычки. Таким образом, в этих витках получают разнонаправленные токи. Корректор питается от стабилизированного источника постоянного тока на  $15 \text{ А}$  с полярностью, противоположной полярности импульса тока первого канала.

Крайние фланцы сильфонных развязок соединены дюралюминиевыми полуцилиндрическими стяжками, которые образуют между собой зазор для разъемов дефлекторов и обеспечивают автоматическую установку соосно с камерой соленоидов, предназначенных для проводки неотклоняемой части пучка электронов через дефлекторную секцию. Каркасы соленоидов - полые, принудительно охлаждаются водой и заполнены каждый 944 витками провода  $\phi 2,02 \text{ мм}$ , так что при номинальном токе  $11 \text{ А}$  обеспечивается в центре соленоида поле порядка  $600 \text{ Э}$ .

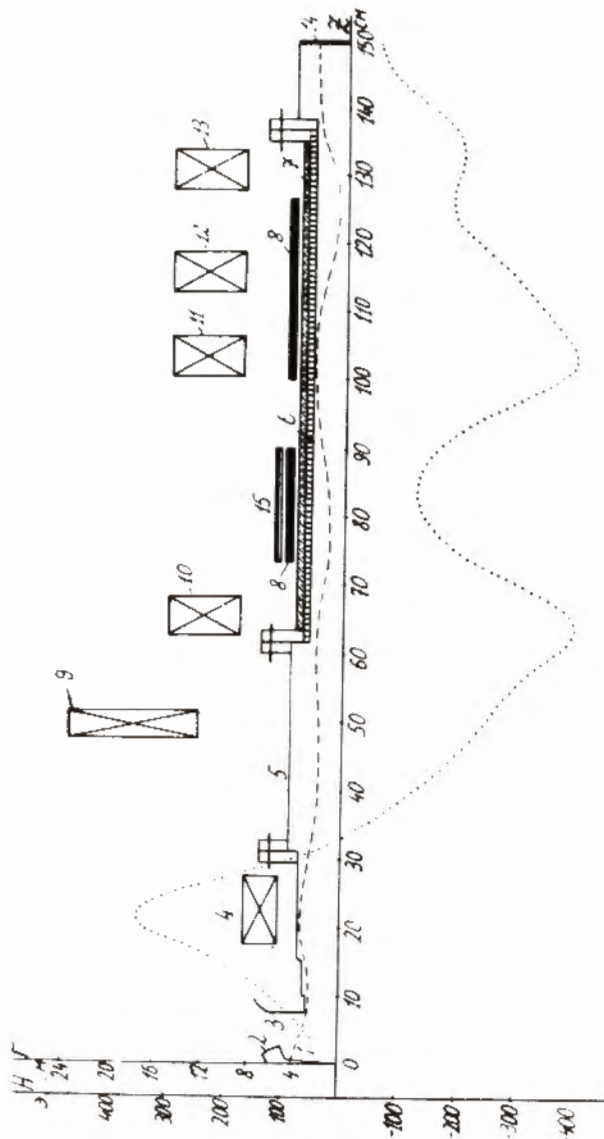
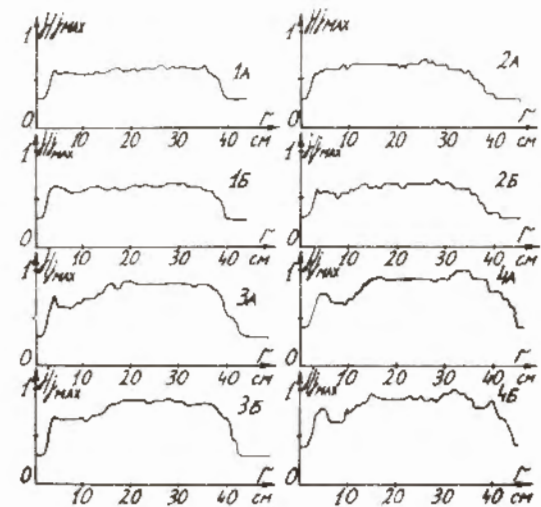


Рис.2. Электронно-оптическая схема ЭЭП-2 с дефлекторной секцией ЛИУ-30; распределение фокусирующего магнитного поля вдоль оси системы (....) и траектория огибающей электронного пучка (---), 1 - эмиттер, 2 - катод, 3 - анод, 4 - первый фокусирующий соленоид, /ф.с./, 5 - проставочный патрубков для формирования пучка, 6 - токоприемник дефлекторной секции, 7 - вакуумная камера дефлекторной секции, 8 - дефлекторы, 9,10,11,12,13 - 2-й,3-й,4-й, 5-й,6-й ф.с., 14 - токоприемник-коллиматор, 15 - корректор.

Рис.3. Распределения плотности тока по сечению пучка: а/ импульсы монохроматизации отключены; б/ монохроматический электронный пучок. 1. 108 А 259 кэВ. 2. 120 А 259 кэВ. 3. 130 А 260 кэВ. 4. 152 А 270 кэВ.



Расчеты по проводке инжектируемых в ЛИУ-30 неотклоняемых электронов осуществлялись, как и ранее<sup>/7/</sup>, на ЭВМ, по теории, изложенной в<sup>/8/</sup>, со следующими критериями приемлемости: а/ угловое расхождение пучка на выходе из дефлекторной секции должно быть минимальным / $\alpha' \rightarrow 0$ /; б/ отклонение огибающей пучка от оси не должно превосходить 2,8 см /внутренний радиус токоприемника/. Вариант расчетного оптимального поля вдоль оси системы, огибающей электронного пучка, а также электронно-оптическая схема ЭЭП-2 с дефлекторной секцией ЛИУ-30 показаны на рис.2.

На рис.3 приведены распределения плотности тока по сечению пучка  $j/j_{\max}$ , снятые на расстоянии 150 см от катода после дефлекторной секции, как это было описано в работе<sup>/9/</sup>, токоприемником-коллиматором и малым коллектором. Хотя распределения /а/ /без подачи отклоняющих импульсов/ по своему характеру отличаются друг от друга, так как снимались они на различных катодах, из рис.3 /распределения "б"/ видно, что включение отклоняющих импульсов и корректора существенно не меняет хода распределений. Сравнение с аналогичными режимами работы катода на короткой системе /без дефлекторной секции/ с теми же значениями зарядного напряжения на тиратроне, тока накала катода, энергии электронов, показывает, что до коллиматора проводится  $\approx 92 \div 94\%$  полного тока, вышедшего с катода.

Из рис.4, на котором приведены осциллограммы импульсов электронного тока на коллиматоре, видно, что дефлектор 1-го канала отклоняет эффективно  $88 \div 89\%$  фронтовых электронов при максимальном токе в дефлекторе 680 А. Дефлектор 2-го канала, имеющий ток 1300 А, отклоняет спадовые электроны полностью /рис.4г/.



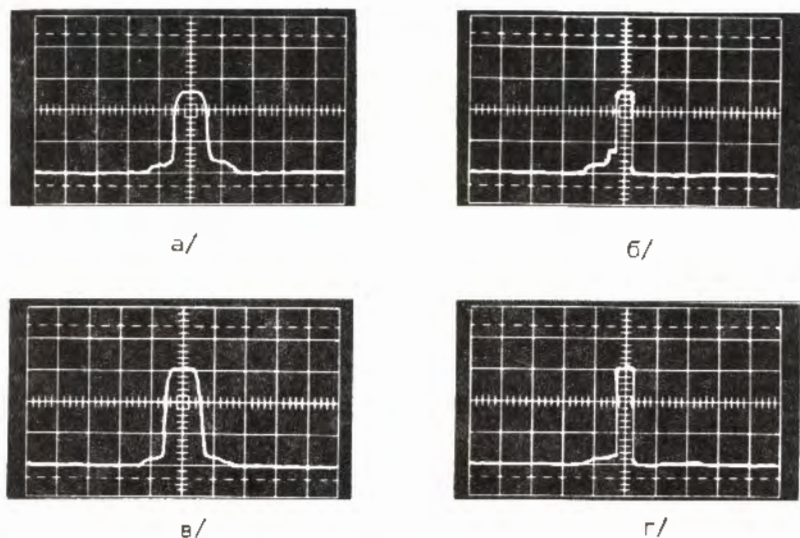


Рис. 4. Осциллограммы импульсов: а/ и в/ - импульсы монохроматизации отключены; б/ и г/ - монохроматический электронный пучок. а, б -  $I_0 = 127 \div 130$  А,  $E = 260$  кэВ, первый канал  $I_{Д1} = 560$  А, второй канал  $I_{Д2} = 870$  А, ток корректора  $I_K = 8$  А. Остаточный ток пучка на фронте  $\approx 16\%$  полного тока. в, г -  $I_0 = 150 \div 152$  А,  $E = 270$  кэВ, первый канал  $I_{Д1} = 680$  А, второй канал  $I_{Д2} = 1300$  А, ток корректора  $I_K = 9,7$  А. Остаточный ток пучка на фронте  $\approx 11\%$  полного тока.

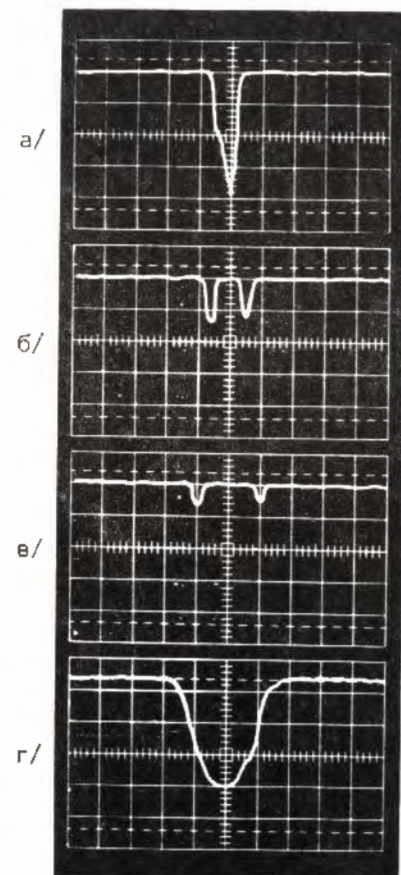
В работе<sup>9</sup> была описана методика измерения вольтсекундной характеристики и эмиссионной способности оксидного катода в течение импульса. Она заключалась в следующем. В различные моменты времени вблизи максимума энергии и тока эмиссии с катода, полностью попадавшего на токоприемник-коллиматор, измерялись значения напряжения /энергия электронов/. Измерения проводились при последовательном снижении тока возбуждения магнита-анализатора, в результате чего широкий единственный пик /рис. 5а/, отвечающий в начальный момент плоской вершине импульса тока, раздваивался, и регистрировались электроны с меньшей энергией /рис. 5б/. С уменьшением энергии /тока магнита/ временной интервал между пиками растет /рис. 5в/. Проектируя моменты времени, соответствующие равным напряжениям на осциллограммах рис. 5а, б, в, на осциллограмму импульса тока /рис. 5г/ или на кривую тока, построенную по тем же временным точкам, можно определить эмиссионную способность катода в течение импульса.

Рис. 5. Осциллограммы импульсов: а, б, в - на магнитном анализаторе. а/ - ток возбуждения соответствует номинальной энергии, б/ - ток возбуждения соответствует энергии, меньшей номинальной на 5%, в/ - ток возбуждения соответствует энергии, меньшей номинальной на 10%, г/ - импульс тока электронов на коллиматоре.

С помощью системы монохроматизации оказалось возможным измерить более низкие значения энергии, так как в предыдущей методике при уменьшении тока возбуждения электромагнита /увеличении временного интервала между пиками рис. 5/ амплитуда их уменьшается, и уже при 25%-ном снижении тока возбуждения магнита они становятся едва заметны.

Крутой спад импульса тока монохроматизации 1-го канала устанавливаем на осциллооскопе одновременно с началом импульса электронного тока, а крутой фронт импульса тока 2-го канала - через 50 или 100 нс в зависимости от желаемой точности. Последовательно передвигая по осциллограмме импульса тока электронов синхронно оба импульса монохроматизации, измеряем магнитным анализатором энергию выделяемых из импульса электронов струек тока. Одновременно определяем амплитуду тока в этих струйках. Таким образом можно построить энергетическое или амплитудное распределение во временной зависимости, либо определить эмиссионную способность катода. Вольтсекундная характеристика катода, распределения плотности тока по сечению пучка которого показаны на рис. 3 /2-4/, представлена на рис. 6.

В штатный комплекс аппаратуры системы формирования монохроматического пучка ЛИУ-30 помимо дефлекторной секции входят генератор системы монохроматизации, шкаф релейной автоматики и пульт управления системой.



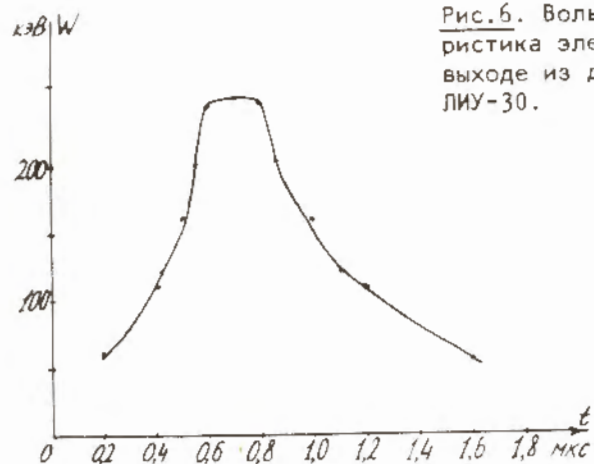


Рис.6. Вольтсекундная характеристика электронного пучка на выходе из дефлекторной секции ЛИУ-30.

Генератор системы монохроматизации включает в себя собственно двухканальную систему формирования импульсов тока дефлекторов с источниками питания на 10 кВ, регуляторами напряжения, накопителями на 1,25 Ом,

тиратронами ТГИ-1000/25, блоками формирования импульсов запуска и т.д., а также регулируемые источники постоянного тока для питания фокусирующих соленоидов и корректора, размагничивания линий.

В шкафу релейной автоматики смонтирована система управления блокировок и сигнализации, тиристорных генераторов и источников питания различных узлов системы монохроматизации, предназначенная для последовательного включения блоков в работу, отключения их при перегрузках и для автоматического регулирования параметров выходных импульсов и токов источников питания с пульта, а также для сигнализации о неисправностях и аварийных режимах. Собственно тиристорные генераторы с высоковольтными источниками питания, накопителями и регуляторами будут установлены между первым и вторым модуляторами ЛИУ-30.

Пульт управления системой спроектирован в виде дополнительной /шестой/ секции главного пульта управления ускорителем, и его предполагается установить с левой стороны этого пульта. Регулировка величины отклоняющего тока в дефлекторах, постоянного тока в соленоидах, корректоре, обостряющих линиях системы формирования, включение всех узлов генератора, а также контроль импульсных параметров генератора, опорных синхроимпульсов запуска каналов, поступающих от синхрогенератора ЛИУ, вынесены на горизонтальную панель пульта. На вертикальной панели смонтированы приборы и табло, сигнализирующие о работе и неисправностях системы.

В заключение необходимо отметить, что все узлы системы монохроматизации, отработанные в 1977-78 г.г. в течение ~100 час. на дефлекторной секции ЭЭП-2 и в 1978-80 г.г. на дефлекторной секции ЛИУ-30 в течение 150 час., а также ~300 час. в 1974-

76 г.г. при испытаниях и исследованиях обостряющих линий, в том числе и системы управления, в отсутствие отдельного пульта смонтированные на пульте управления ЭЭП-2 и на лицевой панели шкафа релейной автоматики, показали себя безотказными и надежными в работе. Стабильность генерирования импульсов, временные и амплитудные характеристики системы достаточно хорошие, что свидетельствует об устойчивости работы.

Автор благодарит И.М.Матору, Ю.Н.Комендантова, В.Б.Заббарова, Ю.А.Метелкина за постоянную помощь в подготовке системы к экспериментам и их проведение, О.А.Стрелину за помощь в расчетах на ЭВМ, а также весь коллектив ООЭП ЛНФ, изготовивший вакуумные узлы дефлекторной секции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Швец В.А. ОИЯИ, 13-8844, Дубна, 1975.
2. Швец В.А. ОИЯИ, 9-10301, Дубна, 1976.
3. Швец В.А. ОИЯИ, 13-9077, Дубна, 1975.
4. Швец В.А. Авт.свид. № 721928, ОИПОТЗ, № 10, 1980, с.214.
5. Швец В.А. ОИЯИ, 13-10302, Дубна, 1976.
6. Швец В.А. ОИЯИ, 13-11399, Дубна, 1978.
7. Швец В.А. Радиотехника и электроника. 1980, т.ХХУ, № 4, с.828.
8. Матора И.М., Стрелина О.А. ОИЯИ, Р9-12673, Дубна, 1979.
9. Анцупов П.С. и др. Радиотехника и электроника. 1978, т.ХХШ, № 12, с.2605.

Рукопись поступила в издательский отдел  
14 мая 1980 года.