

1

И Н С Т И Т У Т
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР

ПРЕПРИНТ И ЯФ 77-1

В.М.Федоров

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА ВОДА 1-10,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ
МОЩНОГО ИМПУЛЬСА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

Новосибирск

1977

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ГЕНЕРАТОРА ВОДА I-10, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ МОЩНОГО ИМПУЛЬСА ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ

В.М.Федоров

А Н Н О Т А Ц И Я

Обсуждаются вопросы, связанные с созданием высоковольтных импульсных источников на основе линий с водяной изоляцией. Приводятся результаты высоковольтных испытаний отдельных узлов и в целом I мгв генератора Вода I-10 на основе двойной формирующей линии, заполненной водой. Зарядка линий импульсная от батареи 50 кв конденсаторов с помощью повышающего трансформатора. Импульс на выходе генератора формируется при срабатывании управляемого разрядника в воде. Генератор Вода I-10 предназначен для формирования электрических импульсов длительностью ~ 60 нсек, напряжением $\sim 10^6$ в и током ~ 200 ка. Ожидаемая энергия, содержащаяся в пучке электронов, 5 ± 10 кдж.

Введение

Генератор Вода I-10 предназначен для формирования электрических импульсов длительностью ~ 60 нсек, напряжением 10^6 в и током ~ 200 ка^{*}). В качестве нагрузки используется вакуумный диод с холодным катодом.

В настоящее время генератор находится в стадии испытаний и налаживания. Строительство и запуск установки Вода I-10 является одним из этапов в развитии программы работ по нагреву и удержанию плазмы, ведущихся в ИЯФ СО АН СССР.

Краткий обзор этой программы изложен в [1].

Генератор Вода I-10 сделан по схеме двойной формирующей линии — ДФЛ с водяной изоляцией. Зарядка линий импульсная от батареи малоиндуктивных конденсаторов 50 кв с помощью повышающего трансформатора. Импульс наносекундной длительности формируется при срабатывании разрядника в воде. Разрядник — с внешней синхронизацией, управляется по принципу усиления электрического поля на остром крае промежуточного электрода. При разработке и конструировании генератора использовался принцип модульности и, в известной мере, независимости отдельных узлов. Повышающий трансформатор, высоковольтный ввод, опорные изоляторы, формирующий разрядник проверялись и доводились на моделях или в частичной сборке генератора. Исследование возможностей отдельных узлов установки позволило получить дополнительные данные, необходимые для конструирования подобного устройства в больших масштабах.

Выбор величины электрического поля в линии с водяной изоляцией

К началу проектирования установки Вода I-10 (первые узлы были сконструированы в 1973 году) не было ясности по некоторым

*) Об установке Вода I-10 был прочитан доклад на советско-американском совещании по импульсным системам [21].

принципиальным вопросам: выбор напряженности электрического поля в воде и на поверхности раздела вода — твердый диэлектрик, работа многоканального разрядника при напряжении ~ 1 мГв и токе ~ 500 ка. Тем не менее основа была. Имелся, во-первых, опыт, накопленный с 1966 г. в ИЯФ СО АН СССР при создании и эксплуатации линий с водяной изоляцией* [2,3,4]. Во-вторых, стали известны успешные результаты, достигнутые в лабораториях США [5,6], в получении сильноточных релятивистских электронных пучков при использовании малоимпедансных генераторов на основе линий с водяной изоляцией. Последнее, конечно, было хорошим стимулом в нашей работе.

В нашей старой работе [2] линия с водяной изоляцией была составлена из трёх коаксиальных цилиндров (внешний цилиндр диаметром $2l$ см, зазор между цилиндрами ~ 1 см, длина 2 м). Вода при заполнении линий дегазировалась и очищалась ионно-обменными смолами и в заполненном состоянии поджималась гидростатическим давлением до 25 атм. Линии заряжались импульсно от ГИНа до 200 кв в течении 1 мксек. Трёх-электродный разрядник в воде коммутировал ток ~ 200 ка при напряжении ~ 200 кв за времена ~ 50 нсек. При разработке этих линий мы опирались на работу Шерера [7], в которой описывалось применение высоковольтного импульсного конденсатора с водяной изоляцией и разрядником в воде в экспериментах по быстрому взрыву проволочек.

Работа с водяными линиями при напряжениях до 200 кв показала, что величину электрического поля в воде на электродах с большой поверхностью $A \approx 2 \cdot 10^4 \text{ см}^2$ и времени зарядки ~ 1 мксек допустимо выбирать на уровне $E_{op} \leq 0,15$ мГв/см. Как показали исследования, проведённые в АWRE высоковольтной группой под руководством Ч.Мартина, данное значение напряженности 0,15 мГв/см следует связать с появлением при больших полях пробоев, инициированных на поверхности положительного электрода. В работе Шипмана [5] приводятся экстраполяционные формулы, полученные обобщением опытных данных, для пробойной напряженности с положительного электрода $E_+ = 0,3t^{1/3} A^{-1/20}$ и с отрицательного электрода $E_- = 0,6t^{1/3} A^{-1/10}$.

ж) Основные результаты, полученные в ИЯФ СО АН СССР на начало 1976 г., представлены в [20].

Здесь t в мксек — эффективное время зарядки, равное промежутку времени нарастания напряжения от уровня $0,63 U_B$ до U_B , A в см^2 — площадь электрода, E — в мГв/см. Кроме того был получен важный результат, необходимый для проектирования высоковольтных установок. Зазор между электродами можно увеличивать линейно с ростом напряжения (от сотен киловольт до нескольких мегавольт), т.е. пробойная напряженность не зависит (или слабо) от величины зазора.

Основываясь на приведённых выше данных, напряженность поля в установке Вода I—10 при проектировании была принята равной 135 кв/см на поверхности положительного электрода и более высокой на отрицательном электроде.

Следует заметить, что данные для пробоя воды, полученные в разных экспериментах, имеют большое различие*. Так в более поздних работах было получено несколько "уточненных" формул пробоя воды, отличающихся между собой на фактор ~ 2 . Краткая сводка результатов дана в статье Миллера [9]. Качественное отличие приводимых там данных от предыдущих формул то, что зависимость E от площади выражена более слабо, а именно $E \sim K \cdot A^{-1/16}$.

Полезность экстраполяционных формул при проектировании больших установок показана Т.Мартинем в [10] на примере генераторов Гермес (ДФЛ с масляной изоляцией). Напряженность поля $E \approx 0,2$ мГв/см в масляных линиях выбрана близкой (!) к "расчётной" согласно эмпирической формуле $E = 0,5 \cdot t^{-1/3} \cdot A^{-1/10}$ мГв/см.

Для установок с водяной изоляцией, описанных в литературе, различие между расчетной и рабочей напряженностью получается несравненно больше. Проанализируем ситуацию на примере известных генераторов *Gamble* и *Hydra*. В генераторе *Gamble* II поле E_- на отрицательном электроде (промежуточная накопительная линия) достигает значения $E_- \approx 0,12$ мГв/см при $U = 6$ мГв (оценка сделана по данным, приводимым в статьях [5,6]). Приведённое значение E_- более, чем в 2,5 раза (!) меньше величины, полученной по формулам для пробоя воды, приводимых в [5]. Пример-

ж) Возможно это связано как с различием использованных электродов и качества воды, так и различием в методах и критериях обработки опытных данных.

но такое же соотношение между рабочей напряженностью и расчетной получается для установки *Hydra* [8], сделанной позже по времени, чем *Gamble*. Причины выбора столь низкой напряженности поля в этих работах не обсуждаются. В работе [8] Т. Мартин отмечает, что следует обратить особое внимание, чтобы не допустить присутствия пузырьков воздуха в воде на поверхности изоляторов (диафрагмы, корпуса разрядника). Наличие пузырьков может инициировать пробой, что приведет к повреждению изолятора. Простая, но радикальная мера предотвращения пробоя — снизить величину электрического поля вдоль поверхности или уменьшить время воздействия напряжения, или оба фактора вместе. Данные о "безопасных" уровнях напряженности вдоль диафрагмы приводятся, например, в [11, 12]: $E_d = 60 + 80$ кв/см при времени зарядки порядка 1 мксек. Отметим, что в новых установках напряженность поля в линиях с водяной изоляцией существенно увеличена. Например, в установке *Proto II* [13], разработанной в лаборатории Сандиа, используются промежуточные накопители на основе цилиндрических конденсаторов с водяной изоляцией. Напряженность поля на внутреннем (отрицательная полярность) и внешнем цилиндрах при напряжении зарядки 3 мкв равны 230 кв/см и 135 кв/см, соответственно.

Общее описание элементов генератора

ДФД генератора состоит из линий Л1 и Л2, которые конструктивно оформлены в виде трех коаксиальных цилиндров (Рис. I). Наружный цилиндрический электрод одновременно играет роль несущей конструкции и герметического контейнера для воды, средний — потенциальный, на который подается напряжение от повышающего трансформатора, центральный — с него снимается выходной импульс. Волновое сопротивление линий Л1 и Л2 равно 2,3 ом каждой. Выходное волновое сопротивление равно 4,6 ом.

Диаметр внешнего цилиндра 62 см, его длина 120 см. На этой длине размещается трехэлектродный разрядник и накопительная линия. Диаметр среднего цилиндра 44 см, длина 100 см. Средний цилиндр (или потенциальный) заряжается положительным напряжением до 10^6 вольт за время $\sim 1,2$ мксек. Напряженность поля на поверхности цилиндра достигает величины 135 кв/см. Со стороны водяного разрядника торец электрода закруглен радиусом 7 см. На-

пряженность поля на закруглении достигает величины ~ 200 кв/см. Со стороны нагрузки торец потенциального электрода имеет малые радиусы закругления $\sim 0,5$ см. Чтобы не допустить усиления поля на этом торце к внешнему и внутреннему краям цилиндра примыкают два кольцевых изолятора из капролона (рис. I). Напряженность поля на поверхности центрального электрода равна 190 кв/см. Внутри него имеется газовая полость отделенная от воды резиновыми диафрагмами. В полость подается газ под давлением $1 + 10$ атм. В результате вода в накопителе находится под избыточным гидростатическим давлением, что уменьшает вероятность появления пузырьков в воде и, соответственно, снижает частоту случайных пробоев. Газовая полость демфирует гидроудары, возникающие после срабатывания водяного разрядника. Центральный электрод электрически соединен с внешним цилиндром посредством спиральной индуктивности. Наличие этой индуктивности обеспечивает сравнительно малый уровень напряжения на центральном электроде в процессе зарядки. Дополнительную изоляцию нагрузки от ДФД в процессе зарядки осуществляет предимпульсный разрядник, помещенный в полости дискового изолятора. Разрядник работает в атмосфере SF_6 и пробивается при появлении на линии импульса большой амплитуды $U \approx 300$ кв.

Участок линии длиной 60 см от предимпульсного разрядника до изолятора вакуумного диода оформлен как передающая линия с постоянным волновым сопротивлением. Примерно в середине линии имеется закорачивающий разрядник, который должен срабатывать в конце действия ускоряющего импульса напряжения и не пропускать колебания тока на заднем фронте импульса в диод. Разрядник двухэлектродный, время задержки пробоя водяного зазора регулируется изменением величины зазора (2 + 3 см). Работа разрядника основывается на том, что пробой в воде, инициированный высоким напряжением, может завершаться при низком уровне напряжения. В аналогичных условиях, например, в газе для завершения пробоя в области наносекундных времен требуется действие высокого напряжения.

Изолятор вакуумного диода — дисковый с принудительным разносом потенциала с помощью пяти металлических колец. Потенциал на кольца задается от емкостного делителя напряжения, расположенного в воде (Рис. I).

В разработке генератора Вода I-10 непосредственное участие принимали инженеры-конструкторы Щепин А.Н., Лисицин А.Д., Семенов Е.П. Высоковольтные испытания и доводка отдельных узлов были успешно проведены при участии Щеглова М.А. Наладивание контура очистки воды было сделано при участии Капитонова В.А. и Шушаро А.И.

Система импульсной зарядки

Для зарядки линий обычно применяются генераторы импульсных напряжений - ГИНЫ и резе повышающие трансформаторы. Временная зависимость электрической прочности жидких диэлектриков требует делать длительность импульса зарядки минимальным. В типичных устройствах характерное время зарядки ~ 1 мксек. Для источников, продуцирующих импульсы сравнительно малых энергий ~ 10 кдж и напряжения ~ 2 мгв целесообразно использовать трансформаторные схемы зарядки, как более простые устройства по сравнению с ГИНАми. При больших параметрах следует отдать предпочтение последним. Во-первых, по причине меньшего к.п.д. трансформаторных схем (имеется в виду: трансформатор достаточно прост и компактен, нет железного сердечника, используется только первый полупериод зарядки). Во-вторых, при передаче больших энергий трудно обеспечить время зарядки в пределах 1 мксек.

В установке Вода I-10 (накопленная энергия равна 15 кдж при 1 мгв) мы применили трансформаторную схему зарядки. Для уменьшения времени зарядки было использовано два трансформатора, работающих параллельно. Импульсное питание первичного витка осуществлялось от малоиндуктивных $L \approx 10$ см секций 50 кв конденсаторной батареи развитой ранее [14,15]. Первоначально батарея была составлена на основе вакуумных разрядников и масляных конденсаторов типа КММ-50-2,5. Последние теперь заменены касторовыми конденсаторами типа МИК-50-4 [14], имеющими меньшие размеры и вес. Энергия, накапливаемая в батарее при 50 кв, равна 76 кдж. Каждая секция 19 кдж снабжена кроубарным разрядником (вакуумные в коаксиальном исполнении), закорачивающим первичный виток после того, как напряжение в высоковольтной цепи достигнет максимальной величины. С целью увеличения скорости зарядки первичный виток трансформатора разделен на два подвитка, которые подключены к

двум 50 кв секциям батареи последовательно. Общая компоновка системы питания и генератора Вода I-10 показана на Рис.2.

Устройство повышающего трансформатора схематически показано на Рис.1. Первичный виток диаметром $20 + 22$ см (сделано несколько модификаций) расположен снаружи вокруг изоляционного цилиндра из стеклопластика толщиной $\sim 1,5$ мм. Цилиндр является частью герметического корпуса, внутри которого размещена повышающая обмотка, выполненная в виде многовитковой катушки, намотанной на оргстеклянный керн медной лентой толщиной 0,1 мм с пленочной изоляцией между витками ($\sim 0,5$ мм). Количество витков было в пределах $20 + 23$. Наружный конец обмотки присоединен к корпусу накопителя, а внутренний - к потенциальному электроду. Выбор суммарной толщины изоляции во вторичной обмотке на напряжение 1 мгв определяется допустимой напряженностью поля в пленочной изоляции. Мы использовали полипропиленовую двухосно ориентированную пленку 40 мк. Для нее было получено

$E_{op} \leq 1,5$ мгв/см из экспериментов с линиями на основе пленочной изоляции, пропитанной водой. Средняя напряженность поля для пленочной изоляции в трансформаторе была принята равной $1 + 1,2$ мгв/см. Для изоляции внутренних витков обмотки, находящихся под высоким потенциалом по отношению к заземленным торцам трансформатора, оставляются закраины пленки $15 + 20$ см от каждого края медной ленты. Разнос потенциала с краев витков вдоль закраин пленки обеспечивается тем, что обмотка пропитывается под вакуумом раствором $CuSO_4$ ($\rho = 1 + 4 \cdot 10^3$ ом.см). Дополнительное уменьшение градиента потенциала на краях достигается за счет того, что профиль обмотки делается слегка конусным.

Вывод высокого напряжения сделан в цилиндрической присоевовой области трансформатора, герметически отделенной от обмотки изолятором из оргстекла. Высоковольтный ввод генератора (см.Рис.1) стыкуется с трансформатором через центральную полость, зазоры между изоляторами заполняются водным раствором $CuSO_4$, длина зазора 18 см. Полость ^спротивоположного торца используется для высоковольтного жидкостного делителя напряжения. Трансформатор испытывался до напряжений 1,2 мгв на холостом ходу и с нагрузкой. Время зарядки накопителя Вода I-10 двумя трансформаторами - 1,2 мксек. Внешний вид одной из моделей 1 мгв трансформатора показан

на Рис.3. Фотография генератора Вода I-10, собранного в укороченном варианте, показана на Рис.4. Трансформатор пристыковывается к накопителю через боковой высоковольтный ввод.

Несмотря на внешнюю простоту трансформатора, требуется особая тщательность и навыки при изготовлении обмотки и пропитки. Так, например, первые образцы изготовленных нами трансформаторов пробивались в течение первого десятка импульсов. В последующих образцах время их службы было существенно увеличено, в основном, за счёт более тщательного изготовления. Один из образцов проработал больше года. Основная причина, приводящая к выходу из строя трансформатора, на мой взгляд, заключается в появлении частичных разрядов в пленочной межвитковой изоляции.

При конструировании трансформатора много труда вложили инженеры-конструкторы Потемкин Г.А. и Семенов Е.П. Экспериментальная доводка и электрические испытания, потребовавшие терпения, были сделаны под руководством Щеглова М.А.

Изолятор в линии с водной изоляцией

В области микро- и наносекундных времен деионизированная вода ($\rho \approx 10^6 \text{ ом}\cdot\text{см}$) представляет идеальный диэлектрик с $\epsilon_w = 80$. Твердые диэлектрики, такие как оргстекло, капролон и другие, имеют значительно меньшую диэлектрическую постоянную ($\epsilon_i = 2 + 4$). Из-за большого различия ϵ наблюдается два ярко выраженных эффекта. Первый, нормальная компонента электрического поля на поверхности изолятора со стороны воды становится малой, т.е. силовые линии поля стремятся обогнуть изолятор - эффект выталкивания поля. Второй, наблюдается эффект тени, т.е. там, где изолятор нависает над поверхностью электрода, напряженность поля на поверхности электрода уменьшается в пределе до $\epsilon_w/\epsilon_i \sim 30$ раз.

На начальном этапе проектирования установки были проведены измерения распределения потенциала на моделях, имитирующих разной формы изоляторы в коаксиальной линии накопителя. Измерения делались для предельного случая, когда отношение диэлектрических постоянных воды и изолятора $\epsilon_w/\epsilon_i = \infty$. Было получено, что распределение потенциала вдоль поверхности кольцевого изолятора,

расположенного между двумя коаксиальными цилиндрами, можно сделать приблизительно равномерным (в однородной среде поле растёт к центру как $1/r$). Равномерность распределения достигается в том случае, если торец изолятора сделать скошенным, причём α - угол нависания изолятора над внутренним электродом будет равен $\alpha = \Delta R/2R \ll 1$, где ΔR - зазор между электродами, а R - средний радиус цилиндров. В этих же условиях для радиального (опорного) изолятора соотношение для конусности запишется в виде $\Delta r/r = \Delta R/R$, где $2\Delta r$ - величина утолщения изолятора от внутреннего к наружному цилиндрическому электроду, r - средний радиус опорного изолятора, остальные обозначения прежние. Машинные расчёты, проведённые позже с учетом конечного отношения ϵ_w/ϵ_i (бралось $\epsilon_w/\epsilon_i = 23$ - вода и капролон), подтвердили правильность оценок, приведённых выше. Расчёты были проделаны Соболевым О.П. по программе КСИ-БЭСМ Вычислительного центра СО АН СССР^{*)}.

Изоляторы, применённые в генераторе Вода I-10 (см.Рис.1), были сделаны из капролона-В-материала, стойкого к ударным нагрузкам. Изоляторы работали успешно при зарядке 1 мГв и испытательных импульсах 1,2 мГв. При этом зазор между электродами был 9 см. Поверхность изоляторов была скошена согласно приведенным выше соотношениям, чтобы достигнуть равномерного распределения потенциала вдоль границы раздела вода - диэлектрик. В месте контакта изолятора с электродом делались небольшие закругления краев.

Показательным, с точки зрения использования комбинации диэлектриков с различным ϵ , является сборка из двух капролоновых колец, прикрывающих тонкий край потенциального электрода (Рис.1 поз.10). Этот узел вызвал большие затруднения при проектировании и были сомнения в успешности его работы. Хотя модельные эксперименты и машинные расчёты показали, что напряженность поля на краю электрода в присутствии изоляторов окажется даже меньше, чем в основном зазоре. Фрагмент распределения потенциала вблизи края электрода показан на Рис.5. Высоковольтные испытания показали успешную работу этого узла.

*) Результаты расчёта полей для некоторых высоковольтных узлов приведены в работе [19].

Формирующий разрядник

Наносекундный импульс на выходе ДФЛ формируется при срабатывании трехэлектродного разрядника в воде, закорачивающего то-репс потенциального электрода на корпус накопителя. Разряд в во-де был выбран по следующим причинам. Первое, имелся успешный опыт коммутации в воде линий [2] с параметрами: 200 кв, 200 ка, сопротивление канала $R_c/\rho_c \leq 10^{-1} \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-1}$ при времени комму-тации $\tau_f \leq 50$ нсек. Второе, разрядник в воде не нуждается в дополнительном корпусе, что создает предпосылки сделать малой его индуктивность. Наконец, применение промежуточного электрода с тонким краем позволяет реализовать многоканальный пробой и, следовательно, коммутировать большие токи. Для установки Вода I-10 ток короткого замыкания линии при 1 мГВ равен 430 ка. Необ-ходимость осуществления режима многоканального пробоя в разряд-нике генератора Вода I-10 можно показать на примере следующей оценки. Примем, что длительность фронта импульса $\tau_f \leq 25$ нсек. Тогда для индуктивности разрядника L_g имеем оценку сверху $L_g \leq W \cdot \tau_f / 2,3 = 25$ см. С другой стороны, индуктивность водяного разрядника генератора Вода I-10 равна $L_g = 10 + 12d_1/N_1 + 12d_2/N_2$, где $d = d_1 + d_2 = 5$ см (определяется электрической прочностью водя-ного зазора). Выполнение условия $\tau_f \leq 25$ нсек возможно при числе разрядных каналов $N_1, N_2 \geq 4$.

Преимущество сильноточного водяного разрядника перед газо-вым несколько лет назад было очевидным. Сейчас эти позиции жид-костного разрядника оспариваются. Развиваемый в последнее время газовый разрядник в атмосфере чистого SF_6 или в смеси $SF_6 + N_2$ с многими триггерными поджигами позволяет при быст-рой зарядке линии достигнуть высоких параметров [16, 17].

Ко времени начала проектирования установки Вода I-10 было известно, что разрядники с искажением поля являются перспектив-ными для целей многоканальной коммутации. Подобные разрядники в трансформаторном масле успешно использовались в установках типа Гермес [10]. В генераторах с водяной изоляцией, в основном, экс-плуатировались двухэлектродные разрядники в режиме самопробоя. В [6] приводится эскизный проект управляемого разрядника в воде для генератора *Gamble II*. Из более поздних работ, извест-

ных мне, отмечу доклад А. Колба [12], сделанный на школе по физи-ке плазмы в Новосибирске (август 1974 г.). В докладе сообщалось об успешных испытаниях установки МАХИВЕАМ, в которой импульс на передающей линии формируется после пробоя трехэлектродного с ис-кажением поля разрядника в воде ($U_m = 4$ мГВ, $I_m = 500$ ка, $\tau_f = 50$ нсек). Сведений об устройстве разрядника и его долго-вечности не приводилось. Наконец, в последнее время опублико-вано ряд работ по быстрой коммутации в воде, сделанных в лаборато-рии Сандиа [13, 18].

При эксплуатации разрядника, имеющего промежуточный электрод с острым краем, необходимо знать, как точно нужно устанавливать напряжение на этом электроде. Были проделаны модельные измерения на электролитической ванне. Результаты измерений для одной из конфигураций разрядника приведены на Рис. 6. Получено: 1) имеется достаточно широкий интервал отклонений ΔU от номинального потенциала ножевого электрода U_{02} , когда заметного усиления поля на остром краю не наблюдается ($\Delta U/U_{02} \leq \pm 20\%$ при радиусе закругления меньше 1/50 величины зазора); 2) для резкого уси-ления поля на остром краю необходимо потенциал менять на величи-ну большую его первоначального значения $U_{02} < \Delta U \sim U_0$.

Конфигурация электродов разрядника выбиралась с учетом того, что напряженность поля на отрицательном электроде может превы-шать в два раза ее значение на положительном. Зазор в разряднике устанавливался такой, что напряженность поля на электродах была на $\geq 20\%$ ниже самопробоя. Фотография выемной сборки (промежу-точный и земляной электроды) дана на Рис. 7.

Величина пробивной напряженности в воде измерялась в модель-ных экспериментах в следующей конфигурации: один электрод — поло-вина тора с внешним диаметром 44 см и малым радиусом $r = 7$ см, второй электрод — плоский диск. Испытательное напряжение до $1,2 \cdot 10^6$ вольт, время нарастания $1 + 1,5 \cdot 10^{-6}$ сек. Эффективная пло-щадь закругленного электрода, оцененная по ширине разброса следов пробоя, была $A \approx 500$ см². Гидростатическое давление воды меня-лось в пределах $1 + 8$ атм. В этих условиях было получено, что сред-няя пробивная напряженность на положительном закругленном электро-де была $E_{+g} = 0,21 \pm 10\%$ мГВ/см. С изменением давления воды

($I \approx 8$ атм) изменение пробойного напряжения было в пределах разброса. Если сравнивать приведенное значение E_{+B} с расчётным, то оно ближе к величине, вычисленной по формуле $E_+ = 0,23 \cdot A^{-0,07} \cdot t^{-1/3}$, полученной в *NRL* Эйлертом и Луптоном [9] экстраполяцией данных лаборатории *AWRE*.

Эксперименты с водяным разрядником и работы по его доводке начались в 1975 году. Генератор Вода I-10 был собран в укороченном варианте - длина накопительной линии была уменьшена на 60 см. В этом случае ДФЛ работала как формирующая линия с волновым сопротивлением $2 \cdot W = 4,6$ ом для интервалов времени $\Delta t \leq 18$ нсек. Генератор работал в режиме закороченного выхода (закоротка - непосредственно за изолятором предимпульсного разрядника). Устройство трехэлектродного водяного разрядника показано на Рис. I (поз. 4). Промежуточный электрод с тонким краем расположен между двумя основными электродами потенциальным (положительная полярность) и земляным и по форме напоминает тарелку с толщиной края $2 + 6$ мм. Напряжение U_2 на нем при зарядке возникает за счёт делителя напряжения, образованного емкостями C_{g1} и C_{g2} с управляющего электрода на потенциальный и земляной электроды, соответственно. Иницирование пробоя с края управляющего электрода происходит при быстром изменении его потенциала на величину $\Delta U \sim U_0$, где U_0 - потенциал основного электрода.

Схема, осуществляющая быстрое изменение потенциала среднего электрода, принятая в описываемых ниже экспериментах, заключалась в следующем. В момент времени, предшествующий максимуму зарядного напряжения, пробивается управляемый газовый разрядник (поз. 5. Рис. I). В результате напряжение на среднем электроде начинает осциллировать с периодом $T_c = 2\pi \cdot \sqrt{(L_0 + L_{ad})(C_{g1} + C_{g2})}$. Время переполюсовки можно было менять, варьируя величину добавочной индуктивности L_{ad} , включенной в разрядную цепь со стороны газового разрядника. Коэффициент усиления напряженности поля (средний) в первом зазоре равен $K_1 = [U_0 - U_{02} \exp(-0,3t/T_c) \cdot \cos 2\pi t/T_c] / (U_0 - U_{02})$. Очевидно, что чем ближе потенциал среднего электрода к U_0 , тем будет больше перенапряжение на зазоре и, соответственно, вероятность осуществления многоканального пробоя. После пробоя первого зазора средний электрод принимает потенциал близкий к U_0 . При этом коэффициент усиления напряженности поля

во втором зазоре равен $K_2 \approx U_0/U_{02}$. Для осуществления многоканального пробоя второго зазора необходимо выбирать потенциал U_{02} среднего электрода и, собственно, величину зазора d_2 как можно меньше. Эффект полярности, имеющий место при пробое воды [6, 18], вносит дополнительные коррективы. Так пробой первого зазора происходит с отрицательного острья и для его осуществления требуется большая напряженность поля, чем для второго зазора, пробой которого осуществляется с положительного острья.

Противоречивость перечисленных требований ставит задачу отыскания оптимальных параметров: выбор потенциала среднего электрода, время переполюсовки напряжения и конфигурации электродов. Успешное решение поставленной задачи позволит делать узел управления разрядником простым, как это описано выше. В противоположном случае решение следует искать на пути использования внешнего импульсного источника, генерирующего необходимую величину ΔU для переполюсовки потенциала управляющего электрода. Этот более сложный способ управления разрядником в описываемых ниже экспериментах не использовался.

В первых экспериментах потенциал ножевого электрода U_{02} был $0,29 U_0$, полная емкость зазоров $C_g = C_{g1} + C_{g2} = 2,8$ нФ, межэлектродные зазоры $d_1 = 3,6$ см, $d_2 = 1,3$ см на потенциальный и земляной электроды соответственно. Характеристики разрядника были исследованы для двух значений периодов осцилляций $T_{c1} = 100$ нсек и $T_{c2} = 280$ нсек. В первом случае наблюдался большой разброс в моменте пробоя водяного зазора d_1 . В случае $T_{c2} = 280$ нсек пробой происходил на втором полупериоде колебаний (в конце при $U_0 = 600$ кв и в начале при $U_0 = 1$ мГВ). Типичная осциллограмма напряжения на накопительной линии и промежуточном электроде приведена на Рис. 8. Напряжение снималось емкостными датчиками Д1 и Д2 (Рис. I). Пробой второго зазора $d_2 = 1,3$ см происходил через $30 + 50$ нсек после пробоя зазора $d_1 = 3,6$ см. Осциллограммы тока на закороченном выходе накопителя свидетельствовали о том, что первый зазор разрядника пробивается в одноканальном режиме: длительность импульса тока была затянута до ~ 80 нсек по основанию (напомню, что электрические длины внешней и внутренней линий накопителя в укороченном варианте равны $\tau_1 = 13,5$ нсек и $\tau_2 = 9$ нсек, соответственно). Амплитуда тока, измеренная на вы-

коде поясом Роговского, была в 2 + 3 раза меньше расчётной. Нарастание тока и его амплитуда ограничивались индуктивностью разрядника, работающего в режиме "одноканального" пробоя ($N_1 = 1, N_2 \geq 2$). Действительно, оценка индуктивности разрядника даёт величину $L_g \approx 60$ см, тогда $\tau_{L/W} = 26$ нсек. При электрической длине ДФЛ $\tau_p = 2\tau_2 = 18$ нсек ток в разряднике может нарасти до уровня $1 - \exp(-\tau_p/\tau_{L/W}) \approx 0,5$ от максимального. Дополнительное уменьшение амплитуды тока происходит за счёт ответвления энергии на перезарядку емкостей разрядника и потерь в канале разрядника. Эквивалентная схема испытательной цепи приведена на Рис.9.

Толщина края ножевого электрода в этих экспериментах была 2 мм. Осмотр электрода после его работы в разряднике после 100 импульсов показал, что по краю диска наблюдаются заметные гофры. В дальнейшем толщина кромки была увеличена и в окончательном варианте она была доведена до 5 мм. В следующем опыте потенциал ножевого электрода был $0,32 + 0,39 U_0$. В этом случае период колебаний был сделан $160 + 120$ нсек. Пробой происходил на втором полупериоде колебаний. Режим работы разрядника был не стабильным: наблюдались случаи одноканального и многоканального пробоя (по оценкам $N_1, N_2 = 1 + 3$). Осциллограммы напряжений и токов для случая, когда потенциал U_{02} среднего электрода равен $0,39 U_0$, приведены на Рис.10.

Были проведены эксперименты, когда ножевой электрод имел потенциал $0,5 U_0$ и $0,6 U_0$ и уменьшенную емкость на электроды $C_g \approx 1,5$ нф против 2,8 нф в предыдущих опытах. Зазоры были следующими: на потенциальный электрод $d_1 = 3,1$ см и $d_2 = 2,3$ см + 2,8 см. И в этом случае стабильность многоканального режима работы разрядника оставляла желать лучшего. При увеличении зазора d_2 до 2,8 см и более число разрядных каналов в нем резко меняется от выстрела к выстрелу. Повидимому, оптимальная величина потенциала управляющего электрода находится в пределах $0,4 + 0,5 U_0$ при данном способе иницирования пробоя. Для получения окончательного суждения необходимо проведение дополнительных экспериментов.

Повреждения на электродах после первых импульсов пробоя, с одной стороны, заметно снижают напряжение самопробоя водяного за-

зора и, с другой стороны, увеличивают разброс в его величине. Чтобы не допускать самопробоя разрядника, приходится увеличивать межэлектродный зазор, что ухудшает пусковые характеристики. Возможно, применение материалов более стойких к разрядам в воде, чем нержавеющая сталь марки X18Ni9Ti, использованной в данных экспериментах, позволит улучшить описанную ситуацию.

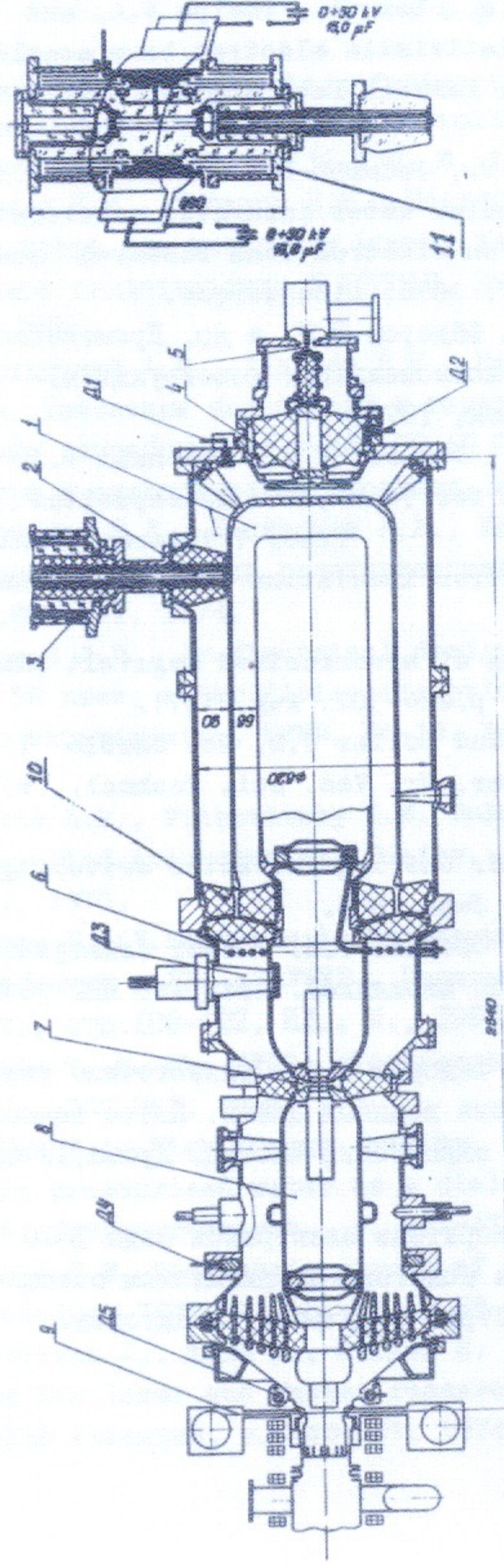
Более широкие возможности иницирования многоканального пробоя предоставляет схема с использованием внешнего генератора. В этом случае перенапряжение в зазоре возникает за счёт подачи на промежуточный электрод импульса от внешнего генератора. Наличие большой емкости C_g с управляющего электрода на основные требует применения мощного генератора. Это соображение послужило основной причиной того, почему система иницирования от внешнего генератора не использовалась в первом варианте установки Вода I-10. В дальнейшем предполагается провести модернизацию узла поджига водяного разрядника и применить дополнительный источник.

Тщательность сборки генератора была обеспечена техническим персоналом установки: Козловым И.В., Жуковым В.Е., Дубровиным В.Н., Анофриковым П.И.

Принятию правильных решений способствовали обсуждения, в которых принимали участие: Бояринцев Э.Л., Корнилов В.А., Николаев В.С., Лагунов В.М., Рютов Д.Д., Щеглов М.А.

Л и т е р а т у р а

- I. Budker G.I. Thermonuclear fusion in installations with a dense plasma. European conf. on controlled fusion and plasma physics, Moscow 1973, v.II, p.136-158, M., 1974.
2. Куликов Б.И., Лагунов В.М., Нестерихин Ю.Е., Фёдоров В.М. Устройство для генерации мощных электрических импульсов. Авторское свидетельство № 270059, Бюл.изоб. № 16, 1970. Приоритет 1966.
3. Искольдский А.М., Лагунов В.М., Нестерихин Ю.Е., Фёдоров В.М. и др. Ёмкостные накопители и генераторы импульсных магнитных полей, разработанные в ИЯФ СО АН СССР. Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция, стр.17, Москва, 1970.
4. Бояринцев Э.Л., Капитонов В.А., Корнилов В.А. "Водяной" - генератор мощного пучка релятивистских электронов. ДАН, т.217, № 4, стр.808-811, 1974.
5. Shipman J.D., Jr. Electrical design of the NRL GAMBLE II, 100 kJ, 50 nsec, water dielectric pulse generator used in electron beam experiments., IEEE, NS-18, N4, p. 243-246., Aug., 1971.
6. Levine L.S., Vitkovitsky I.M. Pulsed power technology for controlled thermonuclear fusion., IEEE, NS-18, N4, p.255-263, Aug., 1971.
7. Шеррер В. (V.Scherrer). Программа исследований взрывающихся проводочек в NRL и AFSWP. Взрывающиеся проводочки, пер. с англ., стр.109-122, ИЛ., М., 1963.
8. Martin T. H. The HYDRA electron beam generator. IEEE, NS-20, N3, p. 289-293, June 1973.
9. Miller R.A. High energy density, low impedance capacitors using pressurized water as a dielectric. Proc. 5 symp. eng. prob. fusion research., p. 471-474, 1974, IEEE.
10. Martin T.H. Dielectric stress of transformer oil in Hermes Blumains. IEEE, NS-16, N3, p.59-63, 1969.
- II. Harrison J., Kolb A., Miller R. Compact electron beam generators for laser and fusion research. Proc. 5 symp. eng. prob. fusion research, p. 640-651, 1974. IEEE.
12. Dobbie C.B., Farge V., Kolb A., Korn P., Phelps D.A. and Ramrus A. A high current relativistic electron beam accelerator for fusion applications. Maxwell Lab. MLR-357, April 17, 1974.
13. Martin T.H., Van Devender J.P., Johnson D.L., McDaniel D.N., Aker M. Proto II - A short pulse water insulated accelerator. International topical conf. on electron beam research and technology. v.1., p. 450-471, 1976, Albuquerque.
14. Аренштам А.И., Понуров В.Н., Фёдоров В.М. и др. Применение уплотнительных прокладок в высоковольтных конструкциях. Препринт ИЯФ 75-23, Новосибирск, 1975.
15. Fedorov V.M., Shcheglov M.A., Ponurov V.N., Deichuli P.P. Low inductance vacuum switch for 50 kV, 100 kJ capacitor bank system. Proc. 7 International Symp. on discharges and electron insulation in vacuum., Aug. 1976, p. 410 Novosibirsk.
16. Markins D. Command triggering of synchronized megavolt pulse generators. IEEE, NS-18, N4, p.296-302, Aug. 1971.
17. Cooperstein G., Condon J.J. and Boller J.R. The Gamble I pulsed electron beam generator. Jr. Vac. Sci. Technol., v.10, N6, p. 961-964, 1973.
18. Van Devender J.P., Martin T.H. Untriggered water switching. IEEE, NS-22, N3, p. 979-982, June 1975.
19. Астрелин В.Т., Лагунов В.М., Соболев О.П. Расчёт электрических полей в системах с водяной изоляцией. Препринт ИЯФ 76-27, Новосибирск, 1976.
20. Корнилов В.А., Лагунов В.М., Фёдоров В.М. Сильноточные ускорители ИЯФ СО АН СССР на основе водяных линий. Пятое всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1976г. (в печати).
21. Фёдоров В.М. Сильноточный ускоритель электронов Вода I-10 для нагрева плазмы. Доклад на советско-американском совещании по системному анализу быстрых импульсных реакторов. Новосибирск, 1976.



1. Импульсная формирующая линия.
2. Высоковольтный ввод.
3. Повышающий трансформатор.
4. Средний электрод, управляющий работой водного разрядника.
5. Тригерный газовый разрядник.
6. Спиральная индуктивность, соединяющая центральный электрод с корпусом.
7. Предимпульсный газовый разрядник.
8. Линия, передающая импульс напряжения к вакуумному диоду.
9. Анодная фольга диода.
10. Изоляторный узел, прикрывающий край центрального электрода.
- 11-Д4 - датчики высокого напряжения.
- Д5 - датчик тока (пояс Роговского).
11. Трансформатор, состыкованный с высоковольтным вводом.

Рис. 1. Генератор Вода I-10.

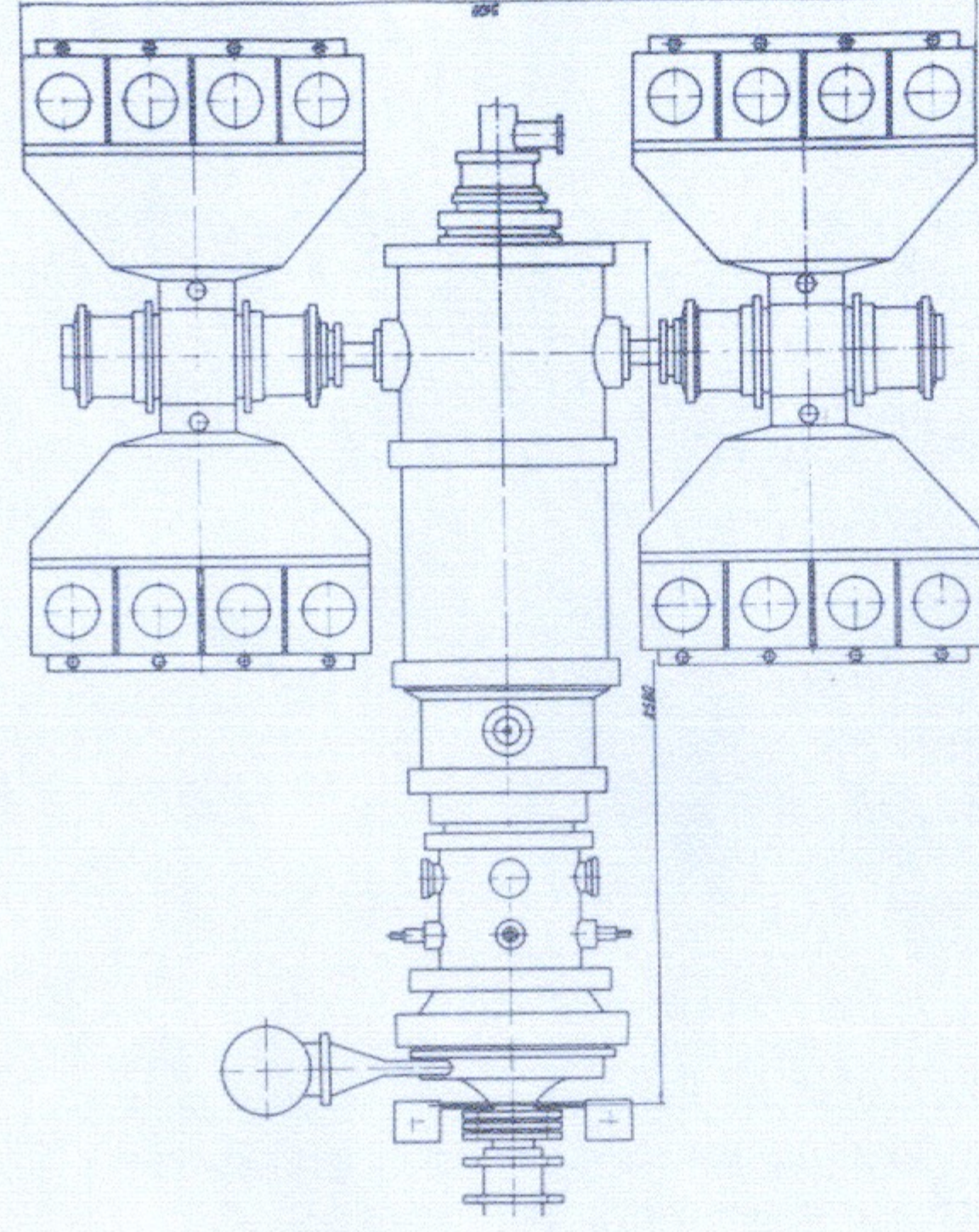


Рис. 2. Общий вид генератора Вода I-10 и системы трансформаторной зарядки.

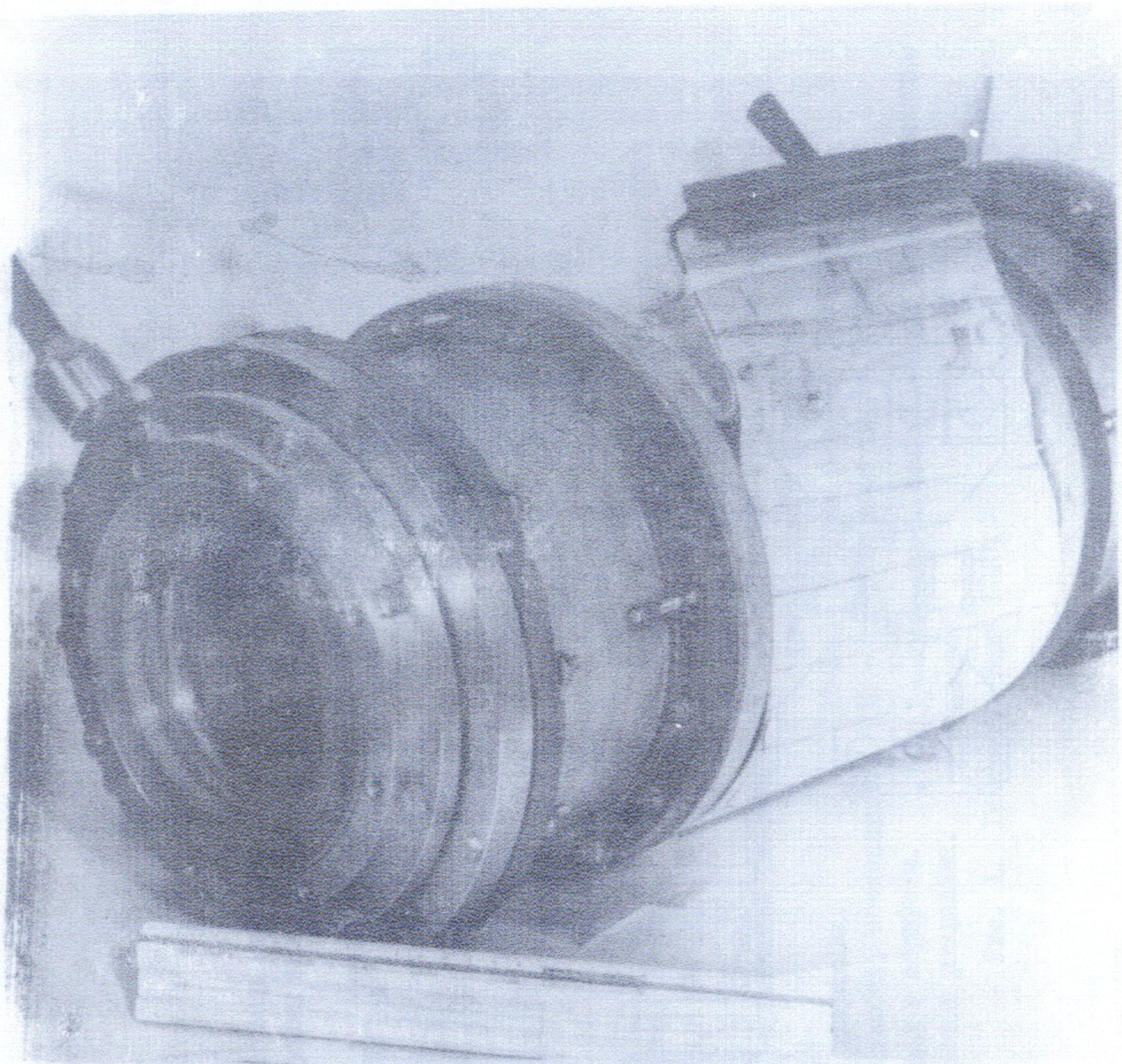


Рис. 3. Фотография одной из моделей 1 мгв трансформатора. Видна центральная полость, которая используется для состыковки с высоковольтным вводом.

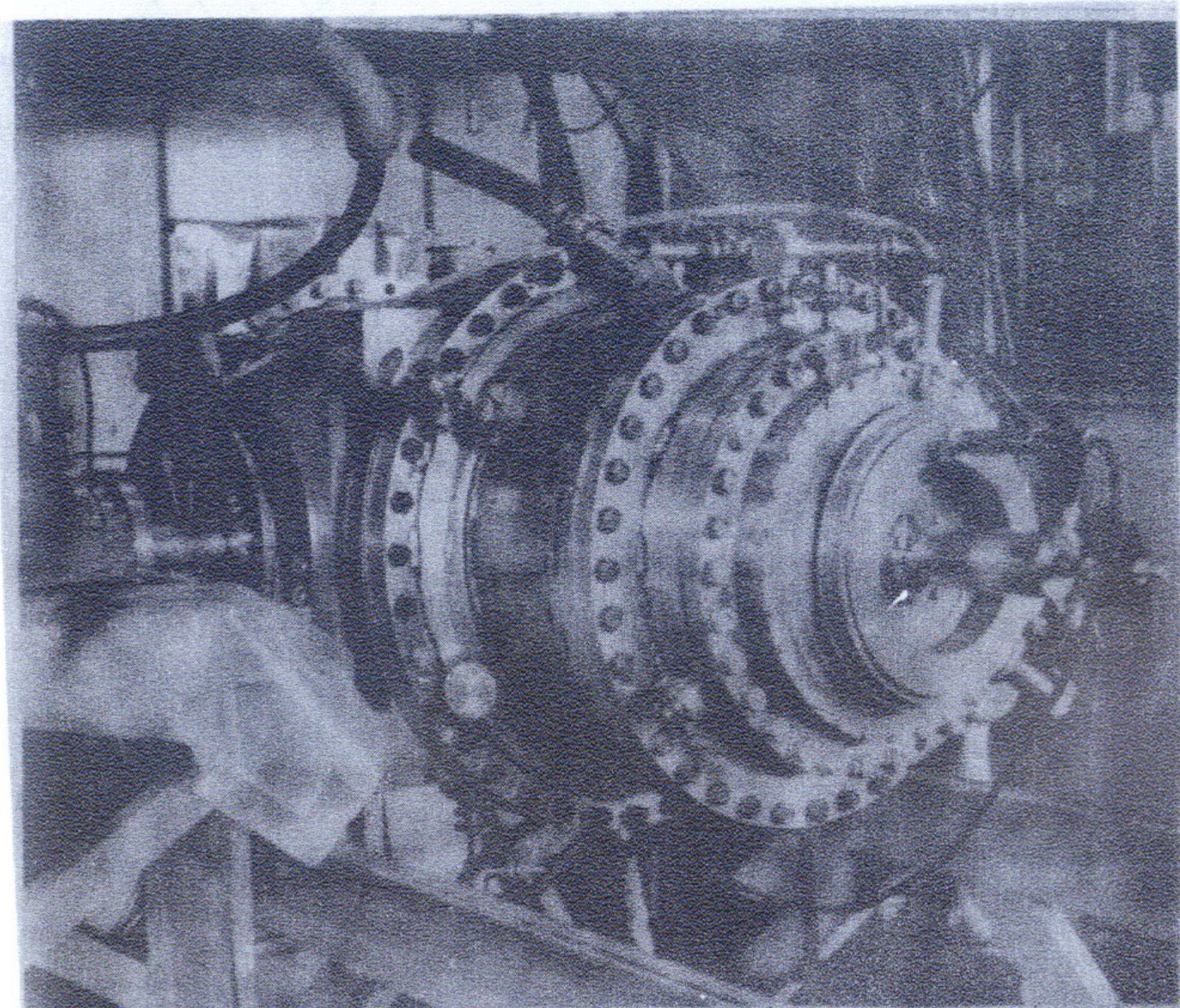


Рис. 4. Генератор Вода I-10, собранный в укороченном варианте. Сбоку виден фрагмент высоковольтного ввода.

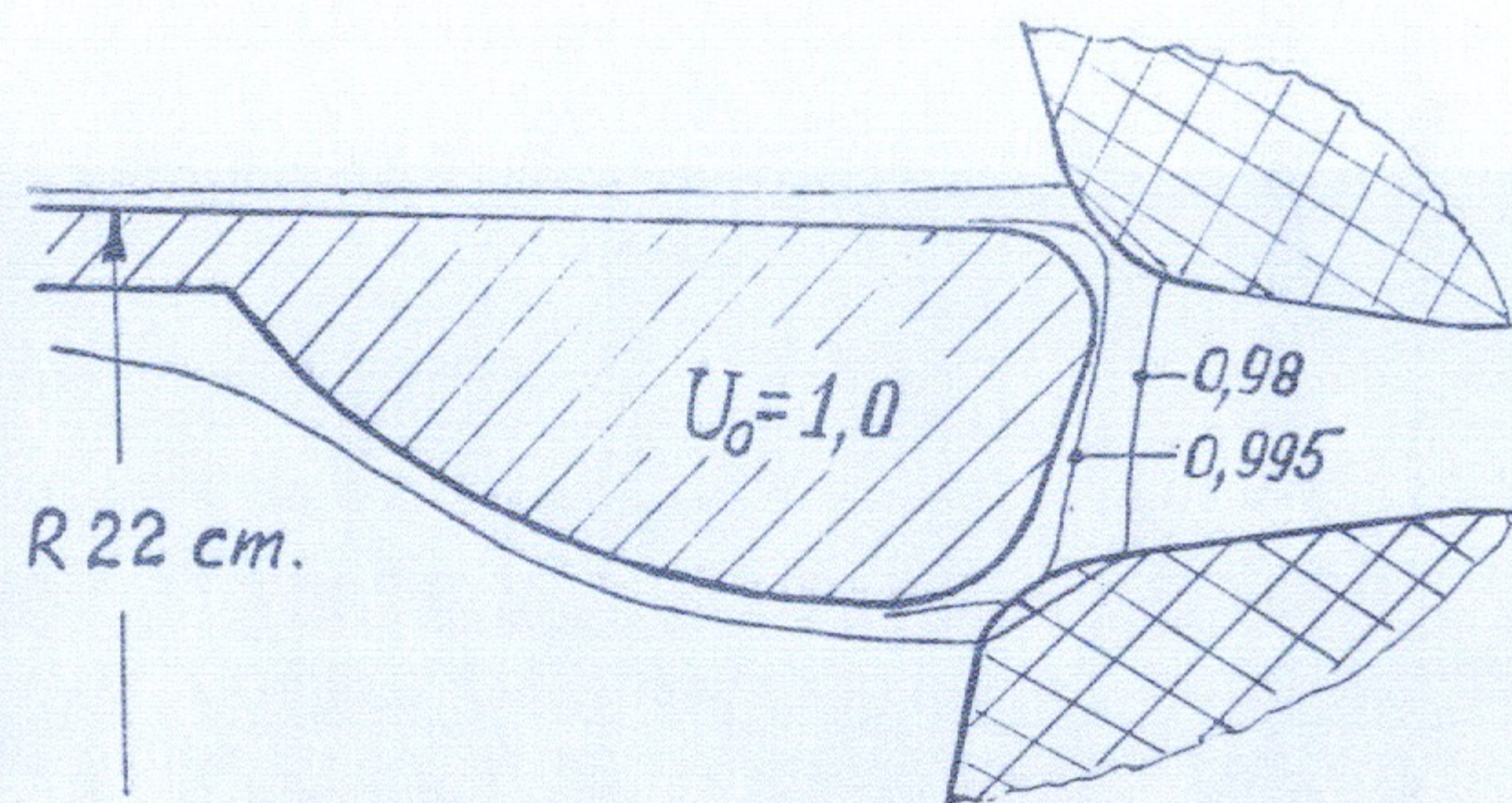


Рис.5. Распределение потенциала вблизи края высоковольтного цилиндра (машинный счет). Диэлектрическая постоянная среды $\epsilon_w = 80$, изоляторов $\epsilon_i = 3,5$. Зазоры между высоковольтным и земляным цилиндрами равны 9,0 см, радиусы закруглений края 0,5 см.

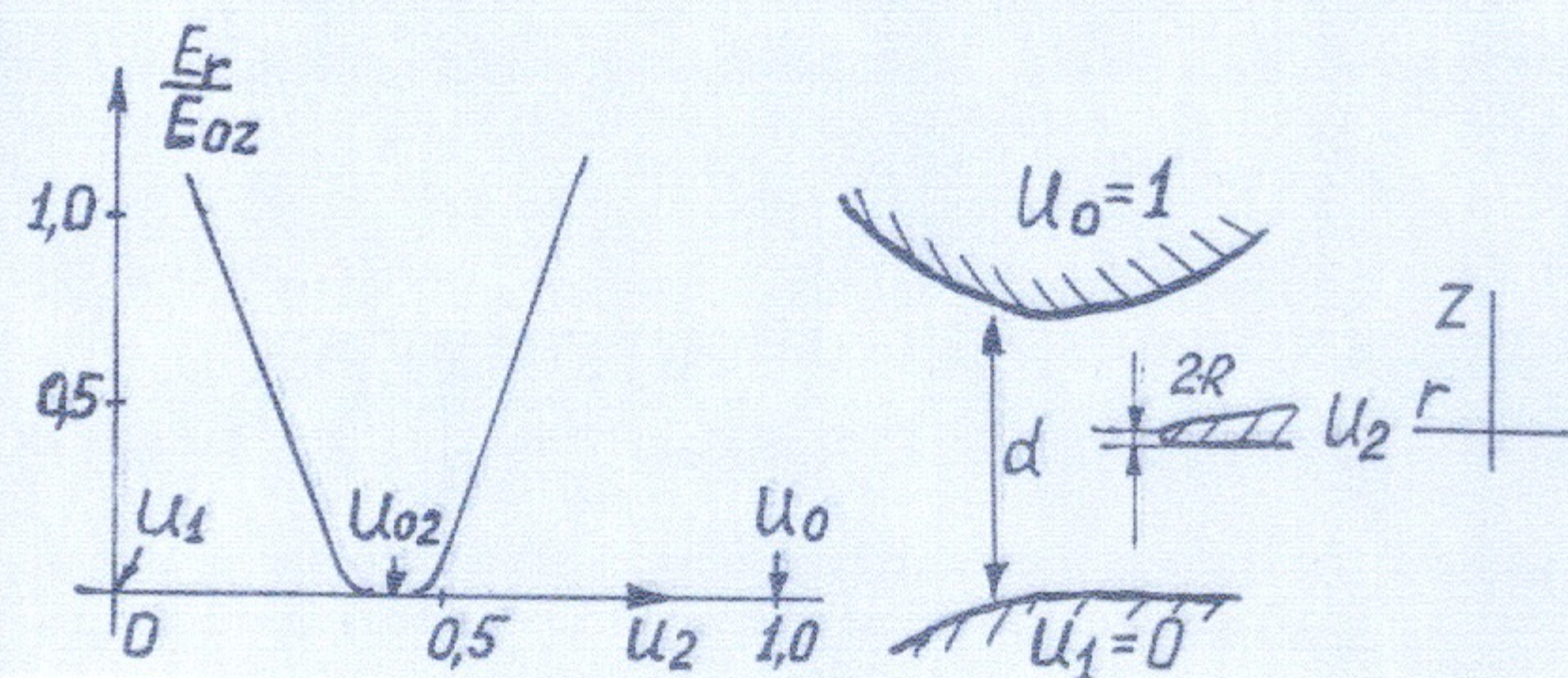


Рис.6. Зависимость электрического поля E_r на краю дискового электрода при изменении его потенциала. Радиус закругления много меньше межэлектродного зазора $R \ll 0,02d$.



Рис.7. Вакуумная сборка разрядника. Видны промежуточный и земляной электроды.

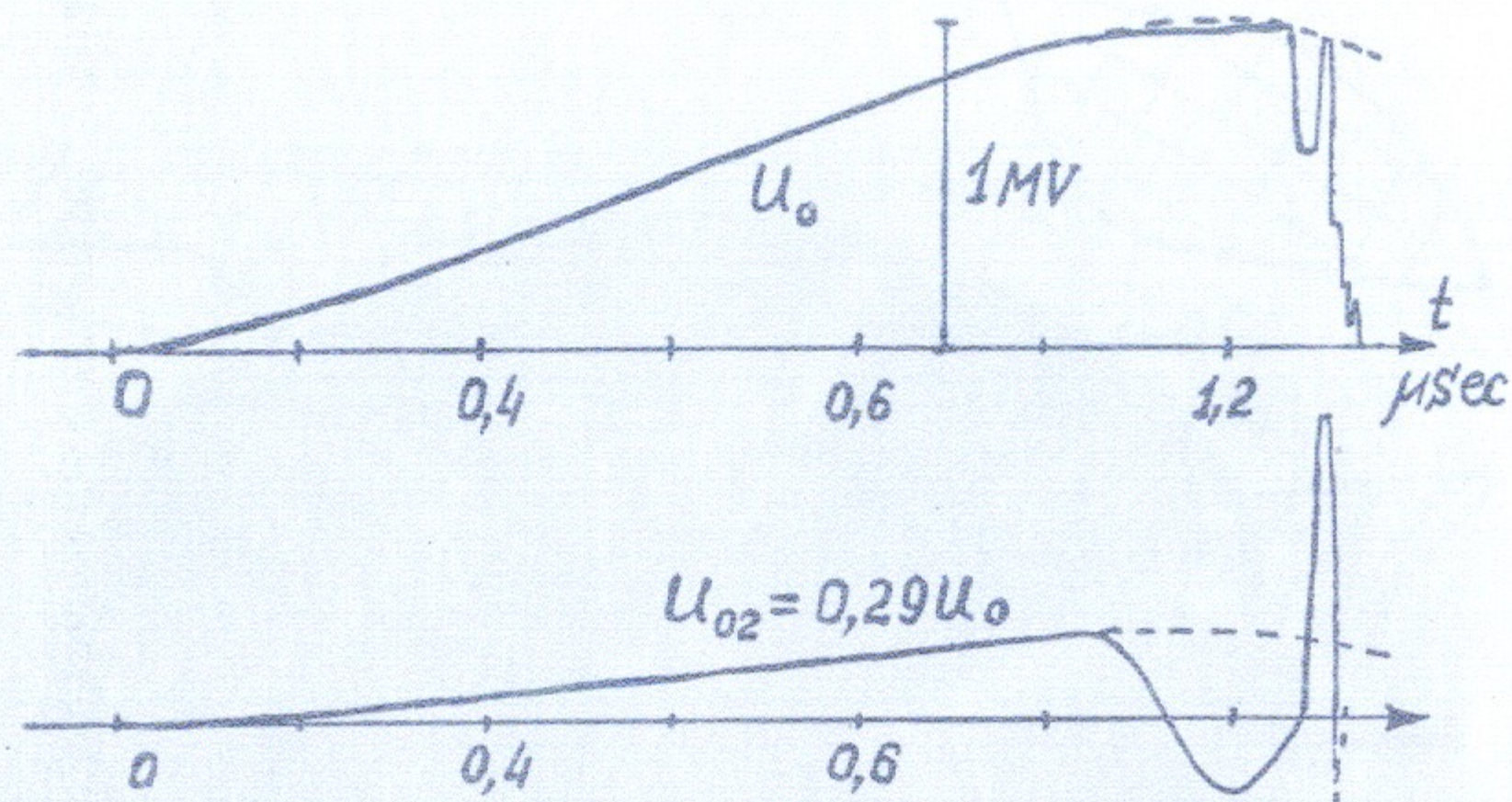


Рис. 8. Осциллограммы напряжения на высоковольтном и управляющем электродах водяного разрядника в моменты зарядки и инициирования пробоя. Емкость накопителя $C_0 = 14$ нф (короткий вариант). Зазоры в разряднике $d_1 = 3,6$ см; $d_2 = 1,3$ см, межэлектродная емкость $C_g = C_{g1} + C_{g2} = 2,8$ нф.

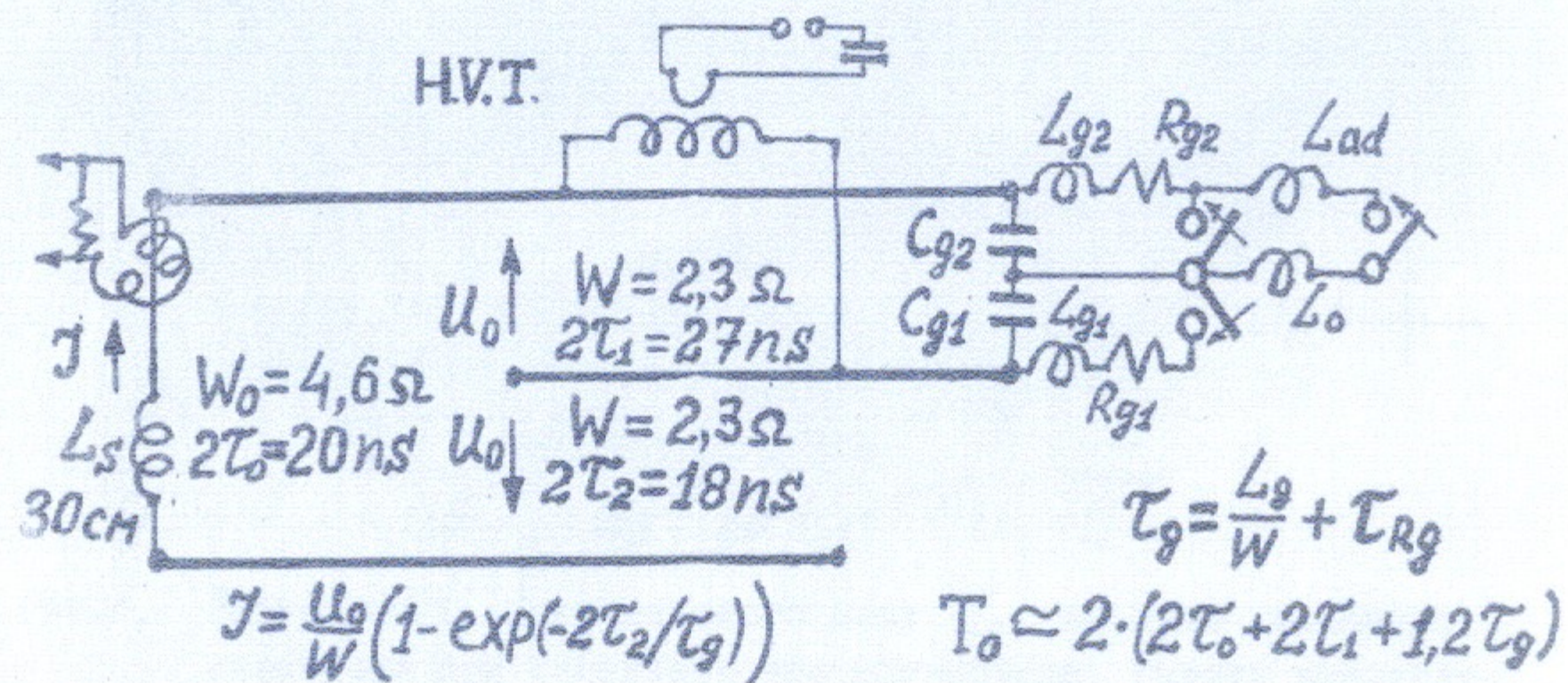


Рис. 9. Эквивалентная схема ДФЛ и водяного разрядника.

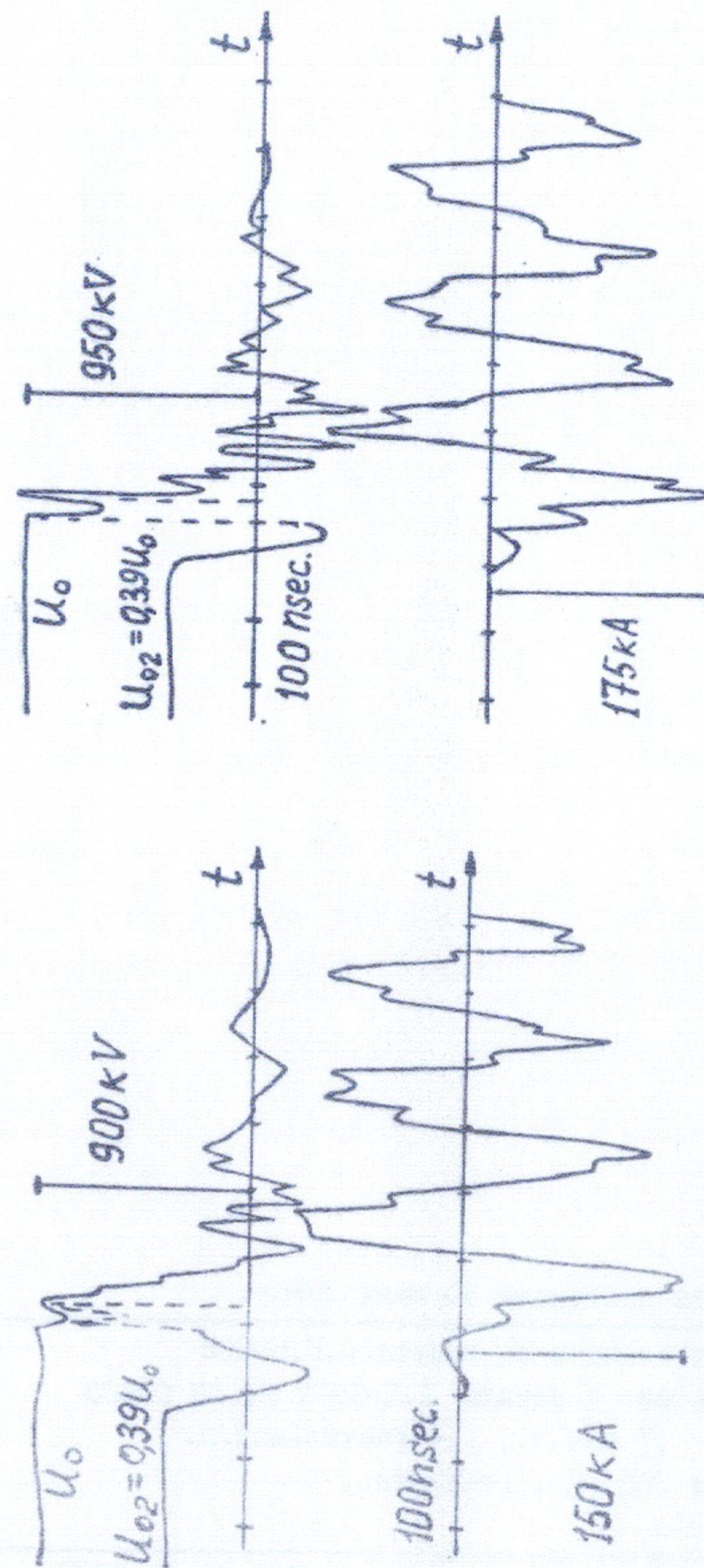


Рис. 10. Осциллограммы напряжения на высоковольтном и управляющем электродах, тока на короткозамкнутом выходе ДФЛ (короткий вариант). Зазоры в разряднике $d_1 = 3,2$ см, $d_2 = 1,8$ см, емкость $C_g = C_{g1} + C_{g2} = 2,5$ нф

Работа поступила 30 июня 1976г.

Ответственный за выпуск С.Г.ПОПОВ

Подписано к печати 1.1-1977 г. МН 02603

Усл. 1,7 печ.л., 1,4 учетно-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно.

Заказ № 1.

Отпечатано на ротапринте в ИИФ СО АН СССР