

53

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

Г.С.Виллевалд, Л.Л.Данилов, В.Н.Карасюк,  
Г.И.Сильвестров

**ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ  
В ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМАХ  
С МЕГААМПЕРНЫМИ ТОКАМИ**

ПРЕПРИНТ И ЯФ 78 - 98

Новосибирск

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНТАКТЫ В ИМПУЛЬСНЫХ  
СИСТЕМАХ С МЕГААМПЕРНЫМИ ТОКАМИ

Г.С.Виллевалд, Л.Л.Данилов, В.Н.Караск, Г.И.Сильвестров

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследуется возможность создания бессиловых жидкометаллических контактных переходов в импульсных системах, проводится обоснование выбора жидкометаллического сплава, экспериментально измеряются величины переходных сопротивлений, распределение полей в жидком металле с целью выбора оптимальной геометрии контакта при различных длительностях импульсов тока из условия минимального нагрева жидкого металла при предельно допустимых плотностях тока. Описываются результаты экспериментов на  $Ga-In$  сплаве при полях в переходах  $40 + 100$  кЭ. Приводятся варианты конструкций с жидкометаллическими контактными переходами.

При проектировании импульсных систем с большими магнитными полями, возбуждаемыми мегаамперными токами, одной из существенных проблем является выбор и конструктивное выполнение контактных переходов от токовых шин, расположенных в области формирования сильных полей и ограниченных в поперечных размерах, к токоподводам. Как правило, формирующие шины на выходе из системы существенно увеличиваются в размерах [1] с целью достижения достаточной контактной поверхности, определяемой предельной плотностью тока [2], и размещения механических устройств, создающих необходимые удельные давления в контактных переходах. В некоторых случаях конструктивные и технологические соображения не позволяют развить основные шины, поэтому возникает необходимость осуществления контактного стыка на минимальной площади, не допускающей размещение прижимных устройств для обеспечения соответствующих контактных усилий.

В связи с этим была исследована возможность создания бессиловых контактных стыков путем использования жидких металлов. Конструктивная схема выполнения одного из вариантов жидкометаллического контактного перехода приведена на рис.1. В одной из шин 1 делаются цилиндрические расточки, вторая шина заканчивается цилиндрическими стержнями 2, которые при стыковке шин уплотняются в расточках, образуя герметичную полость, заполняемую жидким металлом, закорачивающим шины. Шины прижимаются друг к другу с усилием, которое должно компенсировать лишь их взаимное расталкивание силами магнитного поля и обеспечить уплотнение. Уплотнение 3 обеспечивается с помощью изоляционных колец из стеклоткани, пропитанной под высоким давлением эпоксидным компаундом, между которыми помещается резина. Изолятор кроме уплотняющих усилий испытывает воздействие жидкого металла, обусловленное разностью магнитных полей на внутреннем и наружном радиусах контактных элементов. Подобное коаксиальное выполнение контактного перехода повидимому оптимально с точки зрения механических усилий на элементы конструкции и работоспособность его будет определяться взаимодействиями жидкого металла с контактирующими с ним поверхностями.

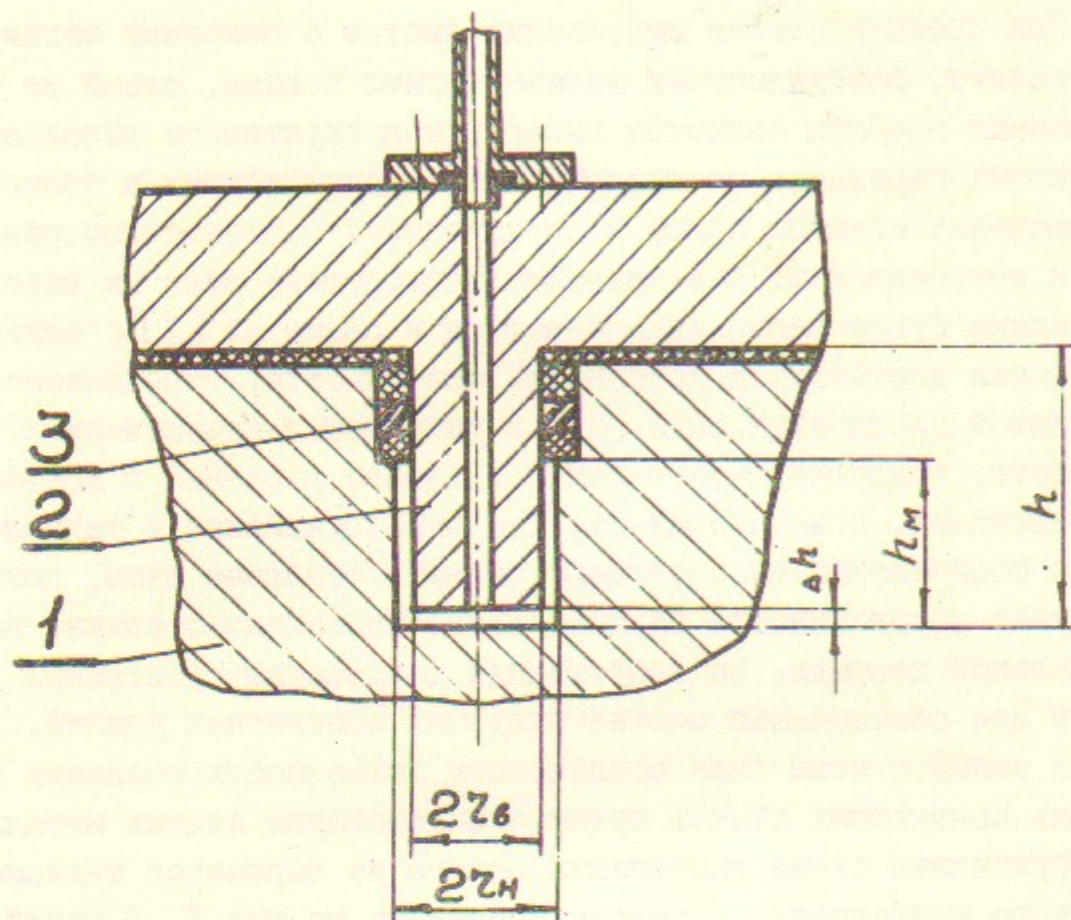


Рис. 1.

### 1. Выбор жидкого металла

В качестве жидких металлов были рассмотрены ртуть и сплавы:  $K-Na$  (минимальная температура плавления равна  $-11^{\circ}C$ )  $Ga-In$  ( $16^{\circ}C$ ),  $Ga-In-Sn$  ( $11^{\circ}C$ ). Хотя интересующие нас конструкционные материалы более коррозионно стойки в ртути и щелочных металлах сравнительно с  $Ga-In$ -сплавами, из-за токсичности и химической активности первых в экспериментах использовались  $Ga$ -сплавы. Кроме того, из перечисленных жидких металлов  $Ga$ -сплавы имеют минимальное электросопротивление ( $80\%Ga-20\%In: \rho = 28 \cdot 10^{-6}$ ,  $75\%K-25\%Na: \rho = 43 \cdot 10^{-6}$ ,  $Hg: \approx 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , что может оказаться существенным при отводе тепловой энергии, выделяющейся в контакте. Поскольку основным конструкционным материалом токовых шин в системах с большими магнитными полями является медь, на ней и проводились исследования. В ряду металлов, составленном по степени их стойкости в  $Ga$ , медь занимает невыгодное место: при темпе-

4.

ратуре  $400^{\circ}C$  ее растворимость в  $10^9$  раз выше, чем у самого стойкого из металлов – вольфрама [3] и составляет  $3 \cdot 10^5 \frac{г}{см^2 \cdot с}$ . Эта величина уменьшается в 100 раз при снижении температуры до  $100^{\circ}C$  и в  $1,6 \cdot 10^5$  раз – при  $50^{\circ}C$ , т.е. при температуре контактного перехода  $\leq 50^{\circ}C$  медь применима. Проверка работоспособности контактов и экспериментальное исследование поверхностных процессов в контактных переходах при предельно высоких плотностях тока и являлись предметом исследования.

### 2. Измерение переходного сопротивления между жидким металлом и электродами

Для оценки величины переходного сопротивления на границе электрод-жидкий металл были произведены измерения на установке, схема которой показана на рис.2. В толстостенный медный стакан 1 плотно вставляется изоляционный цилиндр 2 с внутренним диаметром 20 мм, в который снизу ввинчивается электрод 3 из исследуемого металла, а сверху – электрод 4, подключаемый к источнику тока, второй конец источника подсоединен к стакану. Пространство между электродами заливается жидким металлом 5 и через отверстие в верхнем электроде в него вводится фарфоровый стержень 6 с двумя отверстиями. В одно из отверстий вставляется стальная игла 7 с изолированной поверхностью, упирающаяся острым концом в нижний электрод, во втором отверстии закреплен измерительный электрод 8, который своим торцом контактирует с жидким металлом и может перемещаться вдоль оси для измерения потенциала на разных уровнях  $\Delta h$  жидкого металла. Расположение измерительных электродов симметрично относительно оси системы и в области минимума магнитного поля практически полностью исключает индуктивную наводку при прохожде-

5.

нии через систему больших импульсных токов. Система запитывается импульсом тока синусоидальной формы длительностью 6 мс, обеспечивающей однородность распределения тока по сечению электродов [4]; амплитуда тока 30 кА, что в данной геометрии соответствует плотности тока в контактном переходе 10 кА/см<sup>2</sup>. Измерения проводились со сплавом 80%Ga-20%In. Изменяя положение электрода 8 относительно электрода 3, снималась зависимость величины напряжения от  $\Delta h$  и экстраполяцией ее до пересечения с осью ординат определялось падение напряжения  $U_{\text{п}}$  на контактном переходе. Величина  $U_{\text{п}}$  сильно зависит от состояния поверхности: даже обезжиренная медная поверхность при комнатной температуре плохо смачивается сплавом Ga-In и в таком состоянии при токе 10 кА  $U_{\text{п}} \approx 0,25 \text{ В}$ , т.е. переходное сопротивление составляет  $R_{\text{п}} \sim 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$ . Эта величина уменьшается при многократном прохождении тока. На рис.3

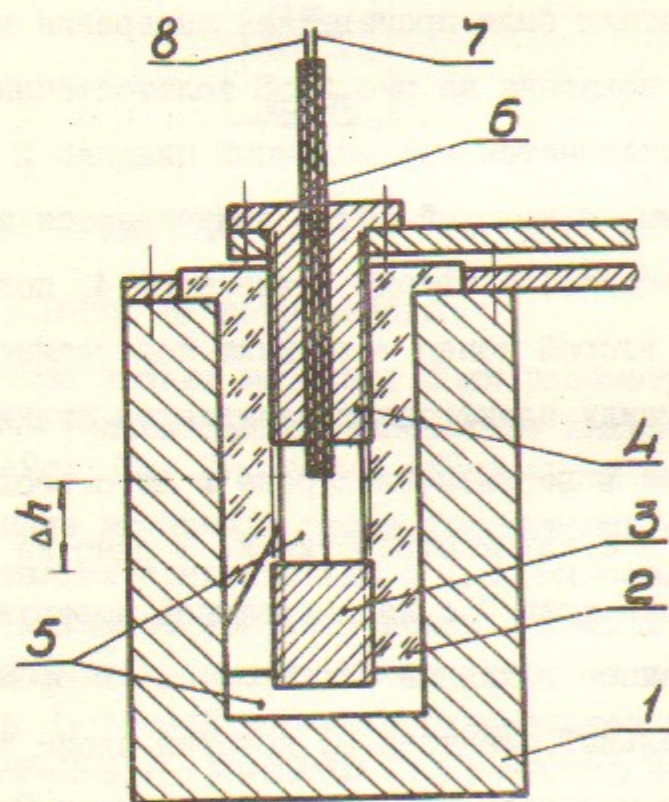


Рис.2

приведена зависимость  $U_{\text{п}}$  на медном электроде от числа импульсов при токе 10 кА (частота следования импульсов 0,2 Гц). Для

обеспечения расчетной величины плотности тока на поверхности, необходимо достичь равномерного смачивания всей поверхности, что достигается принудительным втиранием жидкого металла ме-

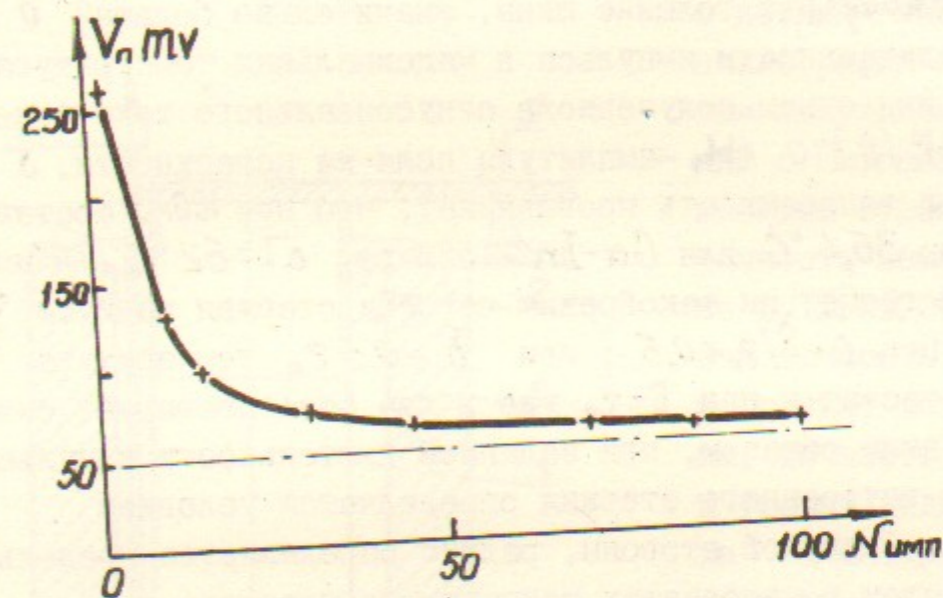


Рис.3

таллической щеткой. Измерения на таких электродах из меди и Ст.3 показали, что при плотностях тока более 3 кА/см<sup>2</sup>  $U_{\text{п}} \sim 10 \text{ мВ}$  (порядка точности измерений), что соответствует переходному сопротивлению  $R_{\text{п}} < 3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ . Погрешность измерения определяется точностью отсчета начальной координаты измерительного электрода, которая составляла  $\pm 0,5 \text{ мм}$ . Удельное сопротивление сплава, вычисленное по амплитуде сигнала, соответствующей падению напряжения на столбе жидкого металла, получается равным  $\rho = (28 \pm 2) \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .

### 3. Выбор оптимальной геометрии контактного перехода

Оптимизация геометрии коаксиального контактного перехода (рис.1) состоит в правильном выборе глубины расточки  $h$ , величины и отношения внутреннего  $Z_{\text{в}}$  и наружного  $Z_{\text{н}}$  радиусов шин, глубины жидкого металла  $h_{\text{м}}$  и величины торцевого зазора  $\Delta h$ . Положение уровня жидкого металла в расточке определяет однородность распределения плотности тока по периметру контакта и зависит от внешней геометрии соединяемых шин. Практически при

любой геометрии шин достаточная однородность достигается при  $h-h_m=(2\div 3)\cdot 2z_n$ . Величины  $z_g$ ,  $z_n$ ,  $h_m$ ,  $\Delta h$  определяются условиями минимума импульсного нагрева при заданных длительности импульса и амплитуде тока.

Известно, что в импульсном режиме нагрев "плоского" скин-слоя  $\delta = c/\sqrt{4\pi\sigma\omega}$  при толщине шины, значительно большей  $\delta$  не зависит от длительности импульса и максимальная температура поверхности при одном полупериоде синусоидального тока составляет  $\Delta T = H_0^2/8\sigma c$  ( $H_0$  — амплитуда поля на поверхности,  $\sigma$  и  $c$  — плотность и теплоемкость проводника), что при  $100\text{кЭ}$  составляет для меди  $36,4^\circ\text{C}$  для  $\text{Ga-In}$  — сплава  $\Delta T = 62^\circ\text{C}$ . В цилиндрической геометрии такой режим нагрева стержня радиуса  $z_0$  имеет место при  $0 < \delta/z_0 < 0,5$ ; при  $\delta > 0,5z_0$  температура поверхности растет и при  $\delta = z_0$  уже в два раза превышает скин-новую [4]. Таким образом, при заданной длительности импульса тока диаметр внутреннего стержня определяется условием  $z_g \geq 2\delta$ . С другой стороны, радиус определяется предельно допустимым полем в материалах контактного перехода.

Ввиду сильного различия в проводимостях меди и сплава  $80\%\text{Ga}-20\%\text{In}$ , они имеют существенно разную толщину скин-слоя ( $\delta_{\text{Ga-In}}/\delta_{\text{Cu}} \sim 4$ ), поэтому с целью проверки распределения плотности тока в жидком металле в переходном режиме в зависимости от длительности импульса, геометрии зазора и уровня жидкого металла были произведены измерения на модели увеличенного масштаба. Схематический чертеж модели показан на рис. 4. В толстостенный медный стакан I, имитирующий расточку в шине, помещается центрируемый изолятором 2 цилиндрический стержень 3 с радиальным зазором  $\Delta z = z_n - z_g$  и торцевым зазором  $\Delta h$ . Глубина расточки  $h = 150\text{мм}$ , радиус стержня  $z_g$  менялся от 24 до 30 мм,  $\Delta h = 5\text{мм}$ . Пространство 4 между электродами заполняется  $\text{Ga-In}$  — сплавом, уровень которого  $h_m$  менялся от 5 до 45 мм. К электродам шинами 5 подводится ток от импульсного трансформатора, в первичную обмотку которого через тиристорный ключ разряжается конденсаторная батарея, обеспечивая во вторичной цепи униполярный импульс тока амплитудой до 100 кА. Внесением в контур дополнительной индуктивности и изменением емкости конденсаторной батареи длительность импульса менялась от  $\tau = 0,5$  до  $\tau = 10\text{мс}$ . Через радиальную щель

6 изолятора в зазор между электродами вводился индуктивный датчик 7 диаметром 3 мм, который с помощью координатного механизма тягой 8 перемещался в осевом и радиальном направлениях, измеряя  $H_\varphi$  — составляющую магнитного поля.

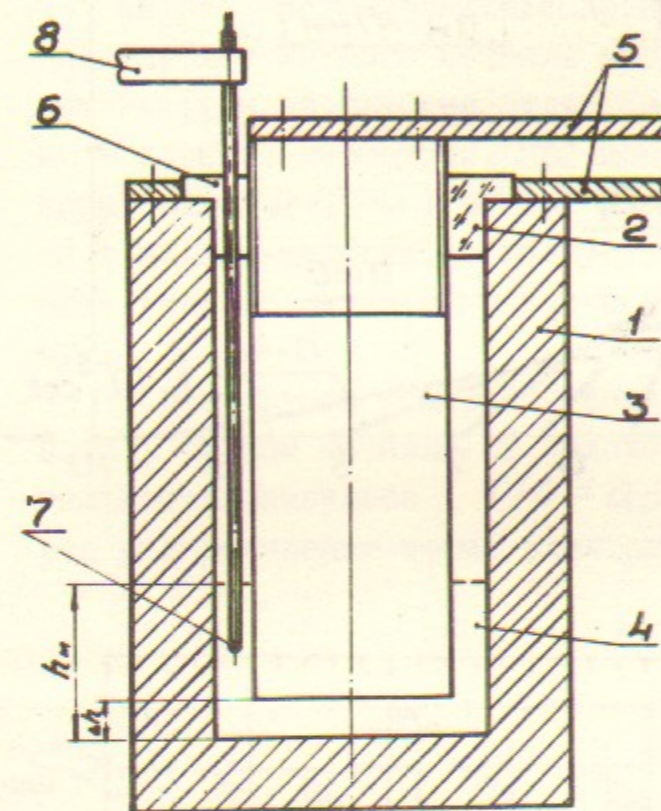
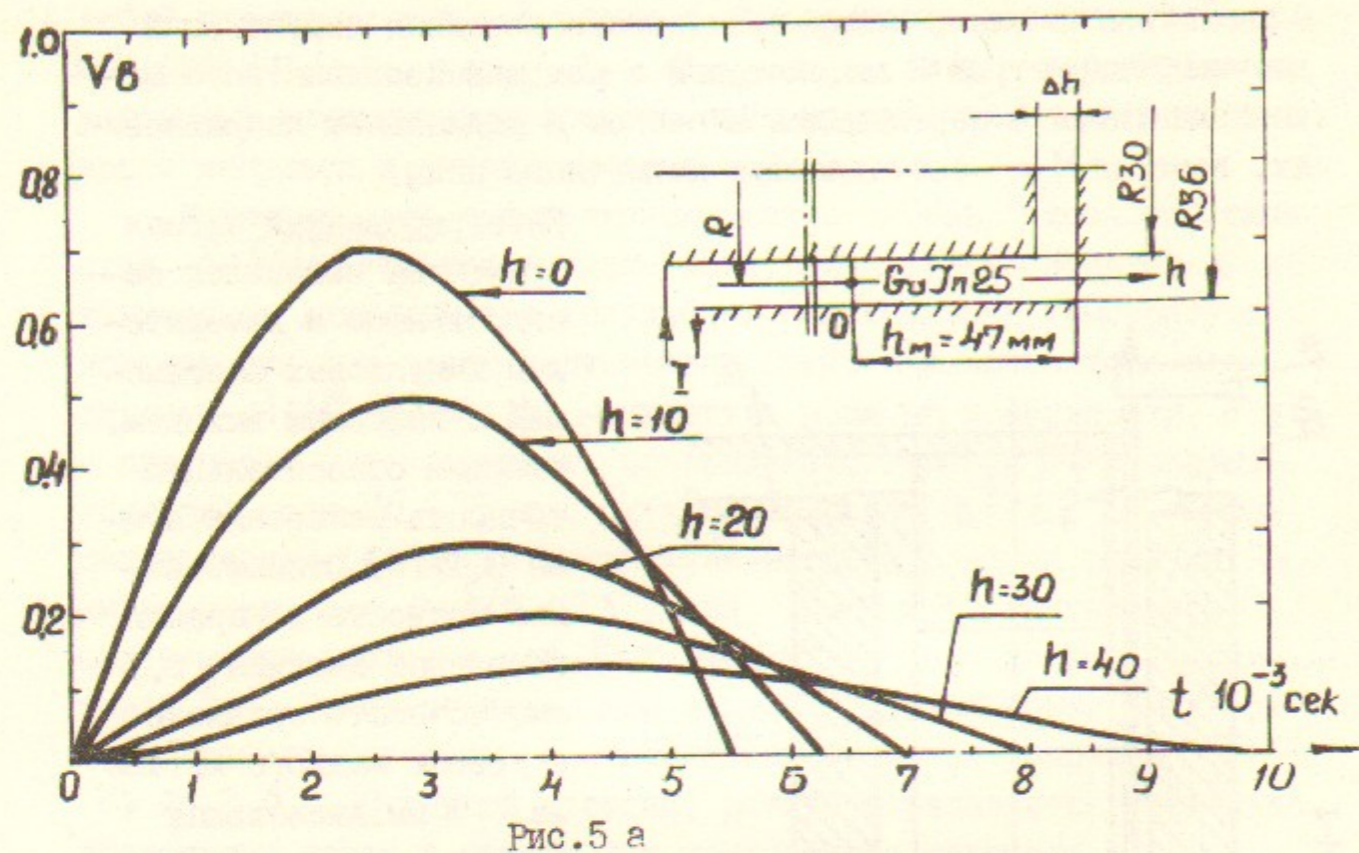


Рис. 4.

интегрированный сигнал с датчика измерялся осциллографом и измерителем импульсных напряжений с цифровым выходом, имеющим относительную точность измерения лучше 0,1% [5]. Относительная точность измерения координат датчика  $\sim 0,1$  мм, точность привязки к уровню жидкого металла  $\sim 1$  мм. Аксиальная симметрия распределения проверялась путем вращения центрирующего изолятора с датчиком вокруг оси.

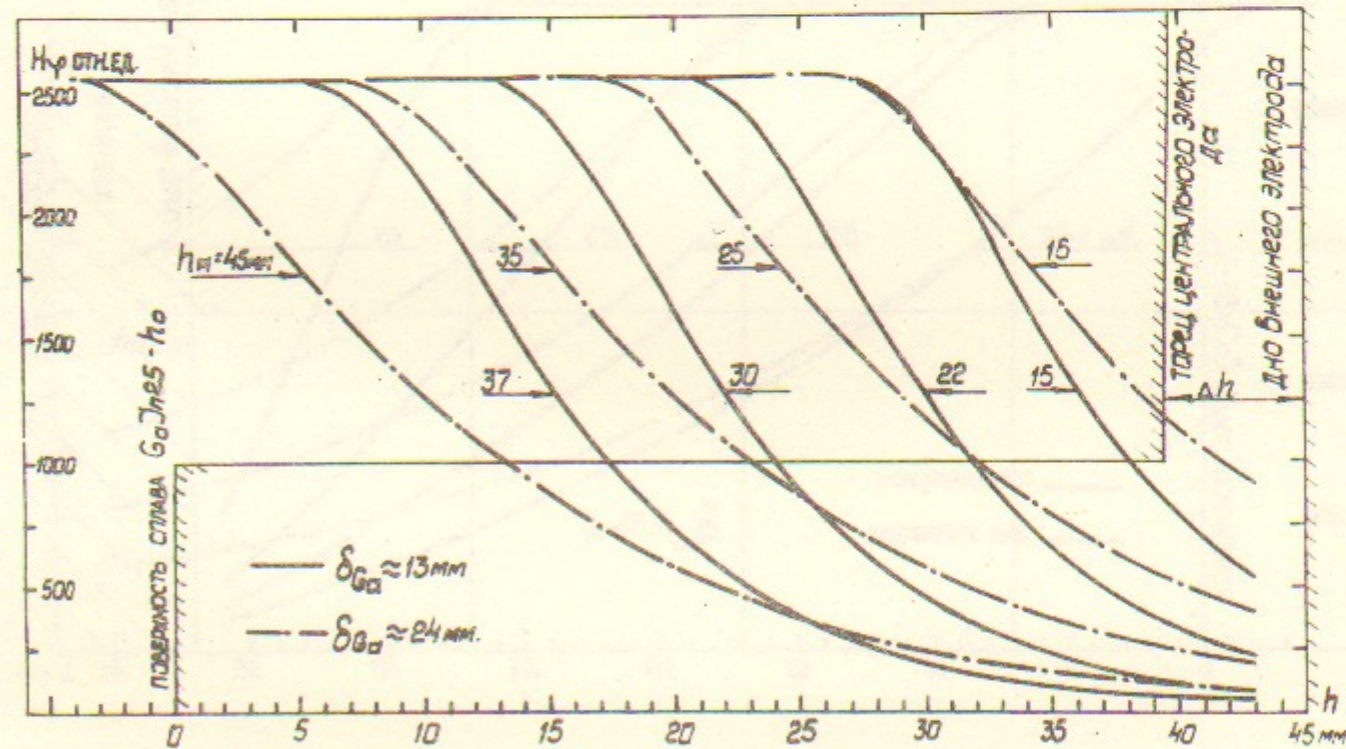
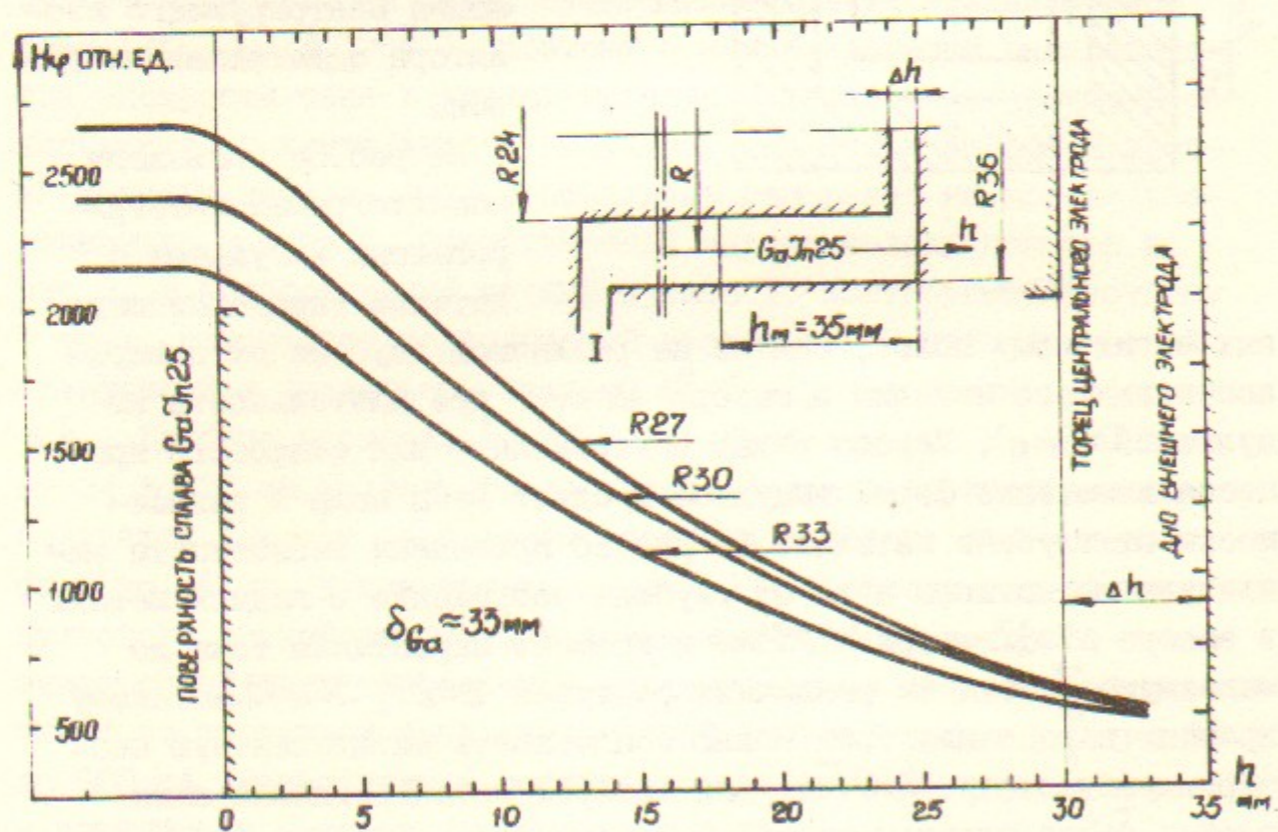
На рис. 5а приведены осциллограммы интегрированных импульсов с датчика (пропорциональных магнитному полю), снятых на различной глубине от поверхности жидкого металла в зазоре  $\Delta z = 6\text{мм}$  при длительности импульса  $\tau = 5\text{мс}$ . Хорошо видно естественное для скин-ового процесса изменение формы импульса и сдвиг фазы поля в зависимости от глубины металла. На рис. 5б приведены зависимости амплитуды магнитного поля от глубины погружения в жидкий металл в зазоре  $\Delta z = 12\text{мм}$  при  $h_m = 35\text{мм}$  и времени нарастания тока до максимума  $T/4 = 4\text{мс}$  на различных радиусах  $z = 27, 30$  и  $33\text{мм}$ . Такому времени нарастания тока можно сопоставить эквивалентную непрерывную частоту  $\approx 60\text{Гц}$ , для которой установившийся скин-слой  $\delta$  в плоской геометрии составит в меди 8 мм, в  $\text{Ga-In}$  сплаве — 33 мм. Из кривых рис. 5б видно, что в указанной геомет-

8.



при ослаблении поля в  $e$  раз происходит на глубине  $\approx 22$  мм, что хорошо соответствует представлению о запаздывании установившегося скин-слоя диффузии поля в металл в переходном процессе. Таким образом, распределение плотности тока в жидком металле в осевом направлении эквивалентно плоской геометрии и существенно меньшая толщина скин-слоя в меди не оказывает влияния на это распределение. Следовательно, при достаточно большой глубине жидкого металла импульсный нагрев и распределение температуры по глубине будут соответствовать скин-нагреву в плоской геометрии. При изменении величины радиального зазора ( $\Delta z = 6$  и  $12$  мм) осевое распределение поля и плотности тока в жидком металле по радиусу как на поверхности, так и в глубине жидкого металла практически обратно пропорционально радиусу.

Результаты измерения зависимости осевого распределения поля в жидком металле от положения его уровня при разных длительностях импульса ( $T/4 = 0,5, 2$  и  $4$  мс.) и влияние на это распределение торца электрода приведены на рис. 6. Из кри-



вых видно, что форма кривых распределения поля по глубине практически сохраняется и при  $h_m \ll \delta$  за счет замыкания доли тока через торец. Исключение торцевого тока с помощью сплошного изоляционного диска под торцом цилиндра (рис. 6 б) естественно приводит к изменению осевого распределения тока при  $h_m \sim \delta$  и соответствующему повышению плотности тока. Доля полного тока, протекающая через торец электрода, зависит, с одной стороны, от соотношений  $h_m/\delta$  и  $\Delta z/\Delta h$ , с другой, при существенно меньшем  $h_m/\delta$ , от соотношения помещенных в жидкий металл площадей; боковой поверхности цилиндра ( $2\pi z_B h$ ) и торцевой ( $\pi z_B^2$ ), т.е. от отношения  $z_B/h_m$ . Поэтому при малых длительностях импульсов тока (т.к.  $h_m \propto \sqrt{\tau}$ ) или при меньших допустимых магнитных полях, когда при заданном токе необходимо увеличить  $z_B$ , размер  $h_m$  можно свести к нулю, так, что весь ток будет протекать через торец цилиндра.

При этом изолятор опускается до дна расточки, а жидкий металл помещается под торцом, занимая объем  $\pi z_B^2 \Delta h$ . Условием отсутствия перегрева жидкого металла в этом случае будет  $z_B \geq 2\delta_{Ga-In}$ . Такой вариант контактного перехода позволяет уменьшить глубину расточки и снизить механические нагрузки на уплотнение (отсутствует выступ в расточке и снижается импульсное давление жидкого металла на изолятор).

Величина радиального зазора  $\Delta z$  (или  $\Delta h$  при больших торцевых токах) с целью снижения тепла, выделяющегося в объеме жидкого металла должна быть выбрана минимальной. Однако, при соизмеримости  $\Delta z$  с допусками на изготовление контактного узла некоаксиальность цилиндров может привести к значительной неоднородности поля в зазоре и как следствие — к локальному перегреву и дополнительным усилиям на изолятор, а при касании стенок — к свариванию электродов. С другой стороны, при малом объеме жидкого металла в зазорах и длительной работе контакта повышается концентрация меди в сплаве и изменяются его свойства. Поэтому при ресурсных испытаниях контактных переходов величины радиального  $\Delta z$  и торцевого  $\Delta h$  зазоров при диаметрах внутреннего электрода 15–20 мм были выбраны равными 1–2 мм.

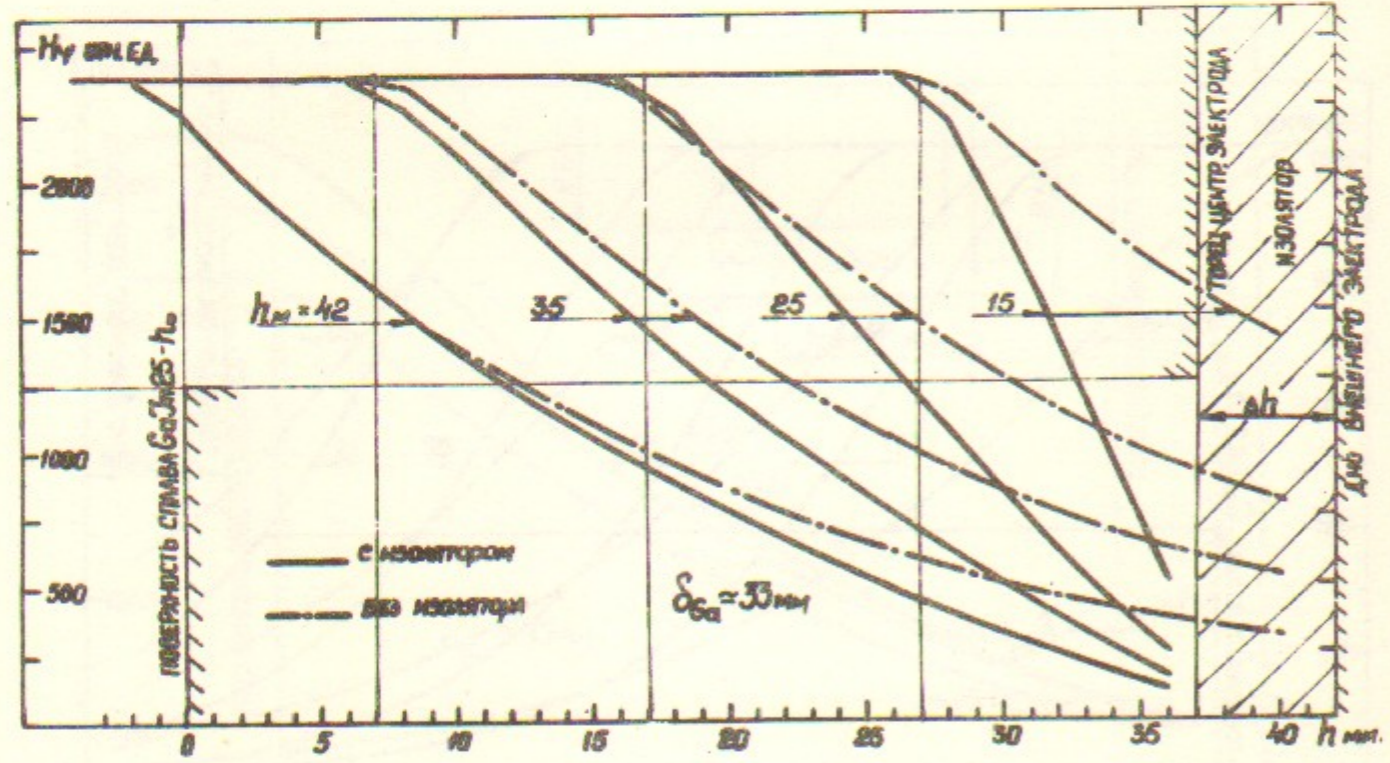


Рис. 6 б.



4. Испытания контактных переходов  
при больших плотностях токов

Ресурсные испытания контактов проводились на установке, схема которой приведена на рис. 7. К выводам трансформатора

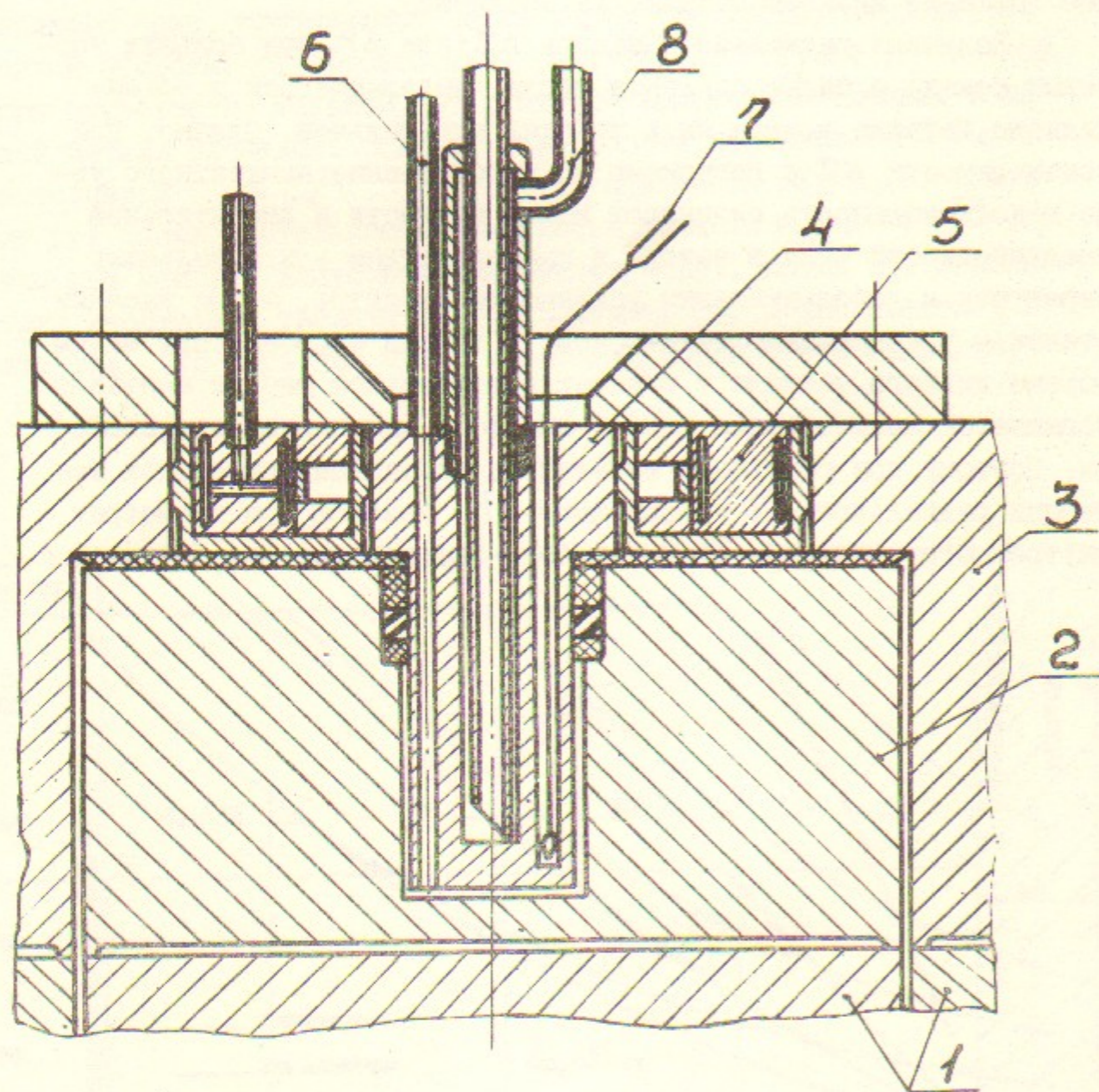


Рис. 7

I подсоединялись плоские шины 2, 3, закорачивающиеся цилиндрической деталью 4 с гидравлическим прижимом контактов 5 на одной стороне 6 и жидкометаллическим контактом на второй.

Деталь 4 центрируется и уплотняется в расточке шины 2, образуя герметичную полость, заполненную через отверстие 6 жидким металлом. Диаметр цилиндрической расточки 34 мм, внутреннего цилиндра 30 мм. Кроме отверстия для заливки жидкого металла в центральном электроде просверлены отверстия для размещения термодары 7 и ввода водяного охлаждения 8. Контактная полость откачивалась и заполнялась  $Ga-In$  - сплавом, в котором создавалось статическое давление 15-20 атм, что обеспечивало надежное заполнение объема и возможность контроля за герметичностью и наличием жидкого металла в системе в процессе работы. Для создания и поддержания статического давления был разработан насос (рис. 8), в котором жидкий металл помещается в нержавеющий сильфон I, расположенный в цилиндре 2, рабочий объем которого 3 заполняется трансформ. маслом и снабжен поршнем 4 с ручным приводом 5. Давление масла, а соответственно и жидкого металла измеряется контрольно-блокировочным манометром, соединенным с цилиндром 2 патрубком 6. При перемещении сильфона I до ограничителя 7 рост давления жидкого металла прекратится, несмотря на рост давления в цилиндре, поэтому параллельно в систему включался аналогичный контрольный насос, использовавшийся и для заполнения объемов металлом и являющийся одновременно индикатором предельного перемещения сильфона I. В первичную цепь трансформатора через дополнительную индуктивность разряжалась конденсаторная батарея, включаемая тиристорными вентилями, создавая униполярный импульс тока длительностью 430 мкс и амплитудой во вторичной цепи до 500 кА. Ресурсные испытания контакта производились при амплитуде тока 500 кА, соответствующей полю на поверхности цилиндра 65 кЭ. Средняя температура цилиндра при частоте циклов  $f=1 Гц$  не превышала  $30^{\circ}C$ . После  $6 \cdot 10^5$  импульсов не было обнаружено существенных изменений контактных поверхностей, что позволило применить жидкометаллические контактные переходы в конкретных конструкциях. В частности, аналогичные контакты были применены для закоротки токовых шин в макете однофазного импульсного магнита с полем до 150 кЭ и током  $\sim 1 MA$ , на которых были произведены дальнейшие ресурсные испытания в различных режимах одновременно на нескольких контактных переходах. Макет магнита (рис. 9)

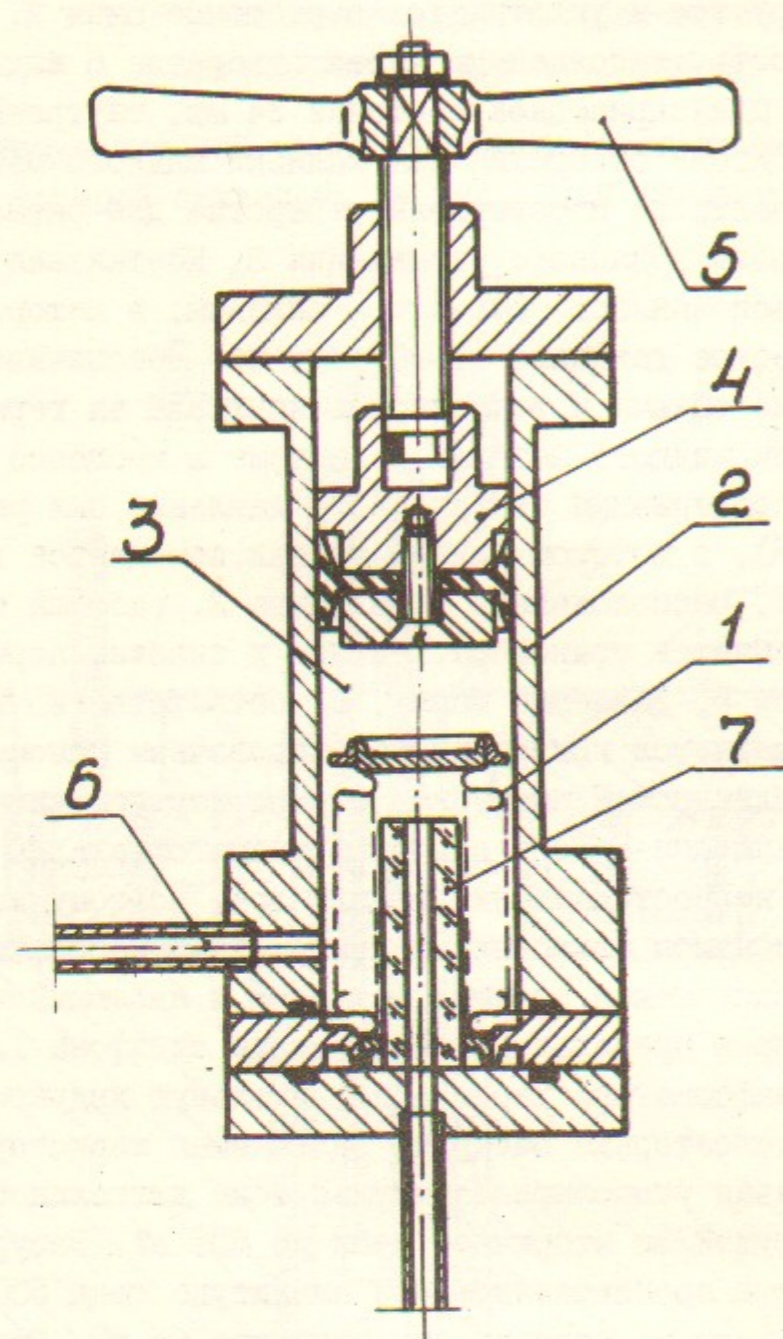


Рис. 8.

представляет собой две формирующие шины I, 2, жестко зафиксированные в силовом бандаже, состоящем из шихтованного магнитопровода 3 и корпуса 4, через изоляционные прокладки 5. Фиксация в поперечном направлении обеспечивается с помощью гидравлического прижима 6 через базовые изоляторы 7, изготовленные из стекловолокна, пропитанного эпоксидным компаундом под высоким давлением. Формирующие шины закорочены на торце коммутирующей шиной 8 с помощью жидкометаллических переходов,

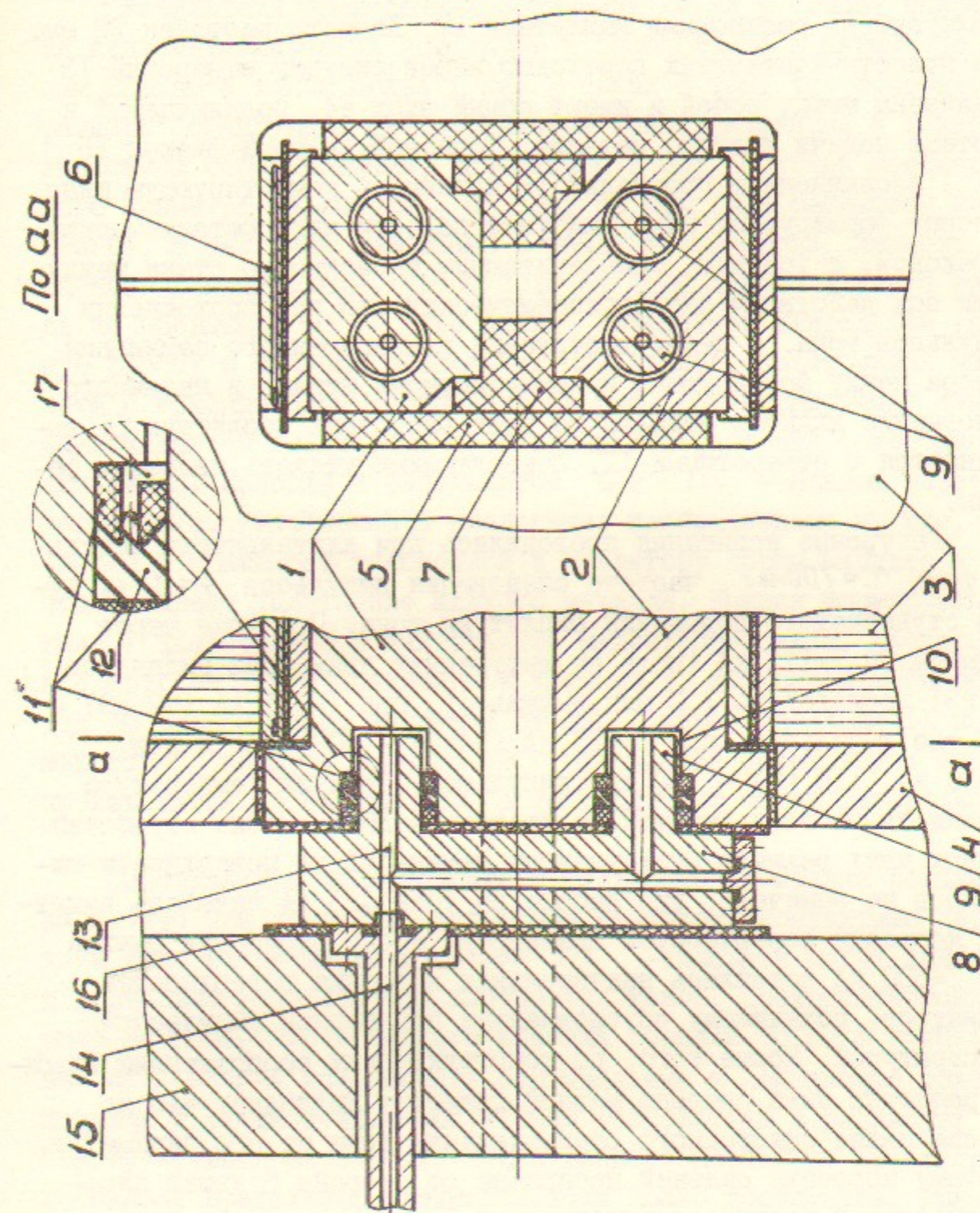


Рис. 9.

состоящих из двух пар цилиндров 9, входящих в расточки, заполненные жидким металлом 10, уплотненном в расточках через изоляторы II резиновыми манжетами 12. Диаметр расточек 22 мм, Все полости контактных переходов через систему отверстий 13 соединены между собой и имеют общий вход 14, подключаемый к системе подачи жидкого металла. Торцевой силовой фланец 15 через изоляционную прокладку 16 прижимают коммутирующую шину к торцу формирующих шин, уплотняя полости жидкометаллических переходов, с усилием, обеспечивающим нераскрытие стыка между ними под действием электродинамических сил при прохождении импульсов тока. С целью достижения одновременного замыкания зазора между формирующей и коммутирующей шинами и надежного уплотнения жидкого металла во всех расточках изолятора II выполняются с отверстиями 17, позволяющими утекать излишкам резины.

Ресурсные испытания проводились при длительности импульса тока  $\tau = 700 \text{ мкс.}$ , частоте следования импульсов  $f = 1 \text{ Гц}$  путем ступенчатого повышения амплитуды тока. При токе через один палец  $I = 175 \text{ кА}$  (поле на внутренних диаметрах цилиндров 39 кЭ) произведено 1,2 млн. импульсов, при  $I = 325 \text{ кА}$  (72 кЭ) — 700 тыс. импульсов, при  $I = 425 \text{ кА}$  (94 кЭ) — 600 тыс. и при  $I = 500 \text{ кА}$  (110 кЭ) — 150 тыс. импульсов. Средняя температура цилиндров на всех режимах не превышала  $50^\circ\text{C}$ . После отработки первых двух режимов существенных изменений на поверхности цилиндров не замечено, при работе на токе 425 кА началась заметная коррозия поверхностей цилиндров, после отработки режима при  $I = 500 \text{ кА}$  появилась значительная коррозия поверхностей цилиндров, по видимому обусловленная повышенной импульсной температурой. Кроме того, по конструктивным соображениям глубина расточки была сделана равной диаметру цилиндра, что не обеспечивает однородного распределения тока по его периметру, поэтому коррозия сильнее проявлена со стороны большей плотности тока и достигает глубины  $\sim 0,5 \text{ мм}$ , в то время как с противоположной стороны она незначительна. На внутренних поверхностях расточек в шинах следов коррозии практически не наблюдалось, что можно объяснить меньшей плотностью тока и более интенсивным охлаждением медных шин. Неблагоприятного

воздействия жидкого металла на изолятор не обнаружено.

Результаты проведенных испытаний легли в основу разработки жидкометаллических контактов в токоподводе к магниту с полем 200 кЭ и током более 1 МА. В связи с тем, что поперечные размеры формирующих шин ограничены конструктивными и технологическими соображениями, размещение в них расточек необходимого диаметра невозможно, поэтому на них были размещены цилиндры, а расточки выполнены в шинах токопровода. Диаметр пальцев выбран таким, чтобы поле на поверхности жидкого металла не превышало 80 кЭ, что должно обеспечить длительную надежную работу в течение нескольких млн. циклов. Конструкция магнита с токопроводом изображена на рис. 10. Формирующие шины I заканчиваются цилиндрами 2, входящими в расточки токоподводящих шин 3. Полости 4 заполняются  $\text{Ga-In}$ -сплавом через патрубков 5. Уплотнение 6 аналогично изображенному на рис. 9. Фланец 7 прижимает токоподвод к изолятору горца магнита и обеспечивает уплотнение жидкого металла. Каждая формирующая шина I запресована в шихтованные магнитопроводы 8, изолированные друг от друга полиимидной пленкой 9. Кольцевой магнитопровод 10 воспринимает нагрузку от шин I через изоляцию II и помещается в корпусе магнита 12. Охлаждение формирующих шин производится по каналам 13, а токоподводов через отверстия 14.

Проведенные исследования и ресурсные испытания показывают, что при правильно выбранной геометрии контактные переходы даже между медью и  $\text{Ga-In}$ -сплавами могут надежно и длительно работать при плотностях токов, соответствующих полю на поверхности жидкого металла порядка 70 кЭ и применение их позволит разработать оригинальные и компактные токоподводы к сильноточным импульсным устройствам в различных конструктивных вариантах. Существенного повышения надежности и большей предельной плотности тока можно достигнуть, применяя более коррозионно стойкие в галлии металлы (например, железо или молибден, имеющие меньшую, чем у меди скорость коррозии соответственно в  $1,5 \cdot 10^2$  и в  $10^6$  раз), хотя при мед-

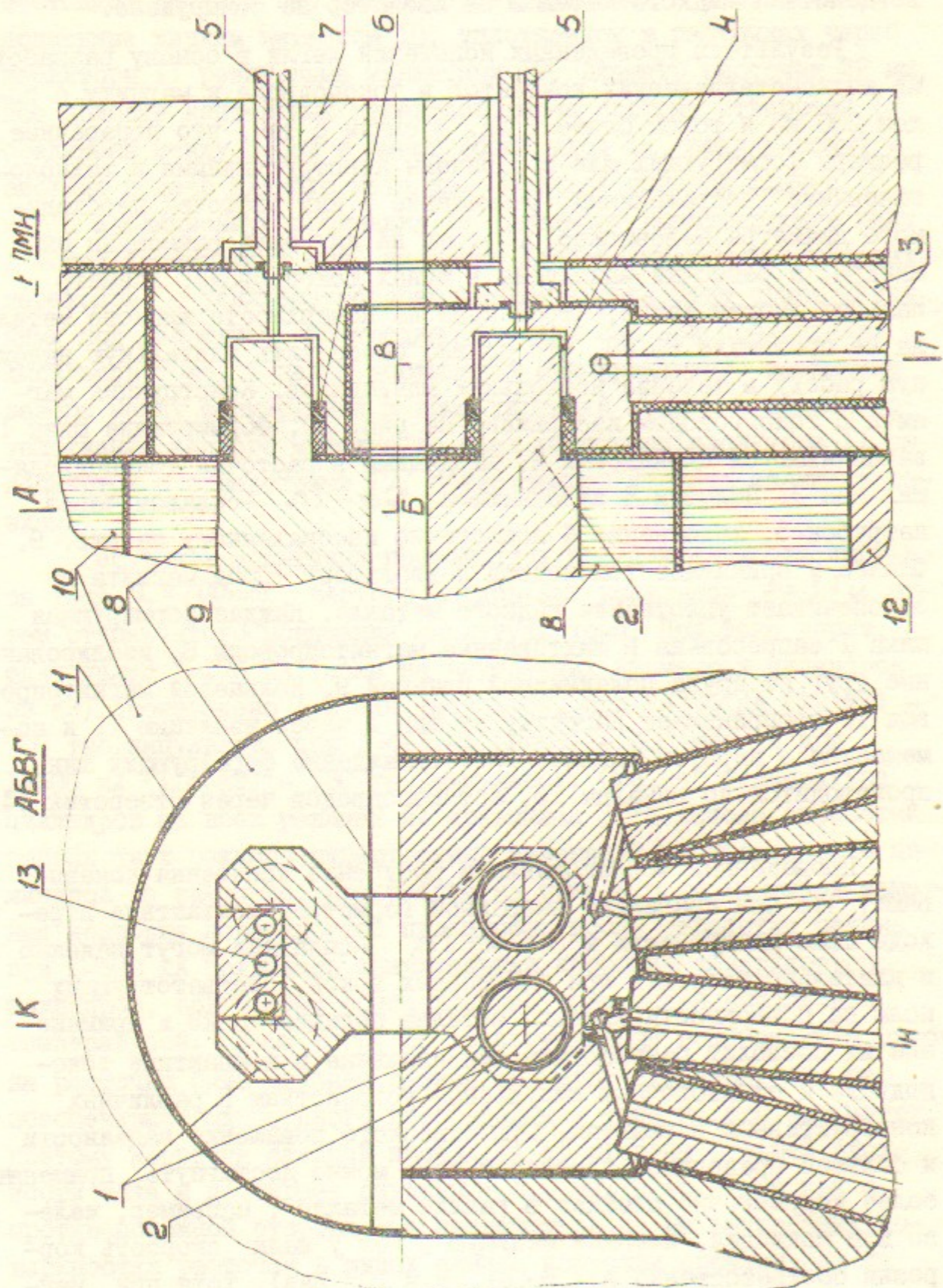


Рис. 10.

ных формирующих шинах возникнут определенные конструктивные и технологические трудности в стыковке и обеспечении токового контакта между этими металлами и формирующими шинами. Кроме того, применение в контактных переходах магнитных полей более 100 кЭ может привести к дополнительным трудностям, связанным с электромагнитным давлением и уплотнением жидкого металла.

### Литература

1. Т.А.Всеволожская, Т.Е.Вечеславова, Л.Л.Данилов, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров, Э.М.Трахтенберг. Применение импульсных магнитов с полями 120 кЭ в блоке конверсии накопителя ВЭП-3. Тр. II Всес. совещания по ускорителям заряженных частиц, т. I, стр. 173, "Наука", М. 1972.
2. Г.С.Виллевалд, В.Н. Карасюк, Г.И.Сильвестров. Испытание контактных пар при больших плотностях импульсных токов. Препринт Института ядерной физики СО АН СССР, ИЯФ-77-35, Новосибирск, 1977.
3. С.П.Яценко. Галлий, взаимодействие с металлами. "Наука", М. 1974.
4. Г.С.Виллевалд, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров. Тепловой режим напряженных параболических линз. ЖТФ, т.48. В.4, Ленинград, 1978.
5. В.Г.Волохов, В.В.Каргальцев, В.А.Киселев, В.И.Купчик, Г.И.Сильвестров. Автоматизированный стенд для измерения импульсных магнитных полей с обработкой информации на ЭВМ. Препринт Института ядерной физики СО АН СССР. ИЯФ-76-90, Новосибирск, 1976.
6. Г.С.Виллевалд, В.Н.Карасюк, Г.И.Сильвестров. Использование гидравлики для создания контактов на мегаамперные токи. Препринт Института ядерной физики СО АН СССР, ИЯФ-77-16, Новосибирск, 1977.

---

Работа поступила - 24 октября 1978 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ  
Подписано к печати 20.XII-78 г. МН 07938  
Усл. 1,3 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.  
Тираж 200 экз. Бесплатно  
Заказ № 98.

---

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР