

47  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Г.Е.Векштейн, В.А.Гапонов

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА  
УСТРОЙСТВА ГИРОРЕЛАКСАЦИОННОГО  
НАГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ В УСТАНОВКЕ  
" АМБАЛ "

ПРЕПРИНТ 80-144



Новосибирск

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ПРОРАБОТКА УСТРОЙСТВА  
ГИРОРЕЛАКСАЦИОННОГО НАГРЕВА ЭЛЕКТРОНОВ В  
УСТАНОВКЕ "АМБАЛ"

Г.Е.Векштейн, В.А.Гапонов

Сооружаемая в настоящее время в ИЯФ СО АН СССР установка "АМБАЛ" предназначена для экспериментальной проверки идеи подавления потерь плазмы вдоль магнитного поля амбиполярными электрическими полями [1]. Такие амбиполярные плазменные ловушки представляют собой систему из трех пробкотронов, соединенных торцами. Если за счет инъекции плотность плазмы в крайних пробкотронах  $n_k$  поддерживается большей плотности плазмы в центральном пробкотроне  $n_0$ , то между центральным и крайними пробкотронами возникает разность потенциалов  $\Delta\varphi = T_e \ln n_k/n_0$ , препятствующая уходу ионов плазмы из центрального пробкотрона. Численные расчеты, учитывающие классические кулоновские столкновения электронов и ионов, дают такие значения параметров плазмы в установке "АМБАЛ" [2]:  
 $n_k \approx 2 \cdot 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $n_0 \approx 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ;  $\langle W_{ik} \rangle$  - (средняя энергия в крайних пробкотронах)  $\approx 20 \text{ кэВ}$ ;  $T_{i0} \approx 0,5 \text{ кэВ}$ ;  $T_e \approx 1 \text{ кэВ}$ . Такая электронная температура устанавливается в результате баланса между нагревом электронов от горячих ионов в крайних пробкотронах, с одной стороны, а с другой - охлаждением на ионах в центральном пробкотроне и выносом энергии электронами, покидающими ловушку.

Поскольку физика удержания плазмы в такой ловушке очень чувствительна к величине электронной температуры  $T_e$ , то для моделирования реакторных условий желательно иметь возможность независимого её изменения с помощью дополнительного нагрева электронов. Кроме того, при достаточно мощном дополнительном нагреве электронов делается излишним их нагрев в крайних пробкотронах, что позволяет

уменьшить энергию инжектируемых туда ионов и, следовательно, снизить магнитное поле в крайних пробкотронах [1]. Всё это инициировало рассмотрение различных возможностей нагрева электронов в установке "АМБАЛ", и, как заметил Д.Д.Рютов, здесь может быть полезен давно известный гирорелаксационный метод нагрева плазмы (см., например, обзор [3]).

При изменении величины магнитного поля в плазме с частотой, много меньшей циклотронной, у заряженных частиц сохраняется адиабатический инвариант  $\mu = m v_{\perp}^2 / 2B$ , так что переменное магнитное поле меняет поперечную энергию частиц. Из-за кулоновских столкновений часть поперечной энергии переходят в продольную, и в результате при периодическом изменении магнитного поля происходит постоянная диссипация энергии. Соответствующие вычисления приведены в [4], где для поглощаемой электронами в единице объема мощности  $Q_e$  получены следующие формулы:

$$Q_e = \frac{n T_e}{\tau_e} \left( \frac{\delta B}{B_0} \right)^2 F_e(\omega \tau_e) \quad (1)$$

где магнитное поле в плазме  $B = B_0 + \delta B \cos \omega t$ ,  $\tau_e \approx 2,2 \cdot 10^{-3} T_e^{3/2} (\text{эВ}) [10^{13} / n (\text{см}^{-3})]$  (сек) — время рассеяния электронов, а  $F(x) = 0,09x^4 + 1,37x^2/x^4 + 2,71x^2 + 1,08$  (график этой функции приведен на рис.1). Из рисунка видно, что оптимальной частотой изменения поля является  $\omega = \omega_* \approx 2/\tau_e$ . При  $n_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$  и  $T_e = 1 \text{ кэВ}$  это соответствует  $f_* = \omega_*/2\pi \approx 5 \text{ кГц}$ . Не исключено, однако, что из-за дополнительных энергопотерь температура электронов может оказаться ниже (так, например, в аналогичной "АМБАЛу" американской установке "ТМХ"  $T_e \leq 200 \text{ эВ}$ ). При  $T_e = 200 \text{ эВ}$   $f_* \approx 50 \text{ кГц}$ . В этом диапазоне частот (5-50 кГц) в качестве генератора может быть использован статический преобразователь частоты на тиристорах ТЧ мощностью до 1 МВт. В приводимых ниже оценках мы будем ориентироваться на частоту  $f \approx 25 \text{ кГц}$ .

Схема устройства гирорелаксационного нагрева электронов показана на рис.2. Она выбиралась такой, чтобы её можно было использовать в уже спроектированной и находя-

щейся сейчас в стадии изготовления конструкции установки "АМБАЛ". Поскольку в эту конструкцию не закладывалась возможность такого дополнительного подогрева электронов, она оказывается далеко не оптимальной, так что относительная передача энергии от ГЕНЕРАТОРА к плазме мала ( $\approx 5 \cdot 10^{-2}$ ). Источник повышенной частоты ( $\approx 25 \text{ кГц}$ ) подключается к индуктору 2, представляющему собой маловитковый соленоид (на рис.2 условно изображен в виде цилиндра). Из-за низкой эффективности нагрева плазмы необходима высокая добротность колебательного контура, для чего параллельно индуктору подключается соответствующая емкость, а сам индуктор должен иметь малые потери, так как ими прежде всего определяется добротность контура (добротность емкости может быть очень большой,  $\sim 10^4$ ). Однако высокие вакуумные условия в установке сильно ограничивают возможности конструирования индуктора. Наилучшим в вакуумном отношении является однослойный соленоид из чистой меди. Рассмотрим добротность такого устройства (рис.2). По конфигурации магнитного поля его можно разбить на три участка. На участках 1 и 3 поле плоско-параллельное. Криволинейное поле у кромок индуктора (уч.П) можно аппроксимировать коаксиальной линией (рис.2в). Определим добротность каждого из этих участков:

$Q = L\omega/R$ , где  $L$  — индуктивность, а  $R$  — сопротивление участка. Для плоско-параллельного поля  $L = \mu_0 h$ , где  $h$  — зазор между противоположными шинами:  $h = R_k - R_u$  (см.рис. 2б);  $R = 2\rho/\delta$ , где  $\delta = \sqrt{2\rho/\mu_0\omega}$  — скин-слой (все шины из одинакового материала). Отсюда  $Q_3 = \mu_0 h \delta \omega / 2\rho = h/\delta = R_k - R_u / \delta$ ,  $Q_1 = R_u / \delta$ . Для коаксиальной линии  $L = \mu_0 / 2\pi \ln R/r$ ,  $R = \frac{\rho}{2\pi\delta} \frac{R+r}{Rr}$ , откуда  $Q_2 = \frac{2}{\delta} \frac{R \cdot r}{R+r} \ln R/r$ .

Участок П является нерабочим, поэтому здесь нас интересует не добротность, а минимальные потери. Поскольку рабочей частью (1) задан магнитный поток  $\Phi$ , то энергия поля в области П  $W_2 = \Phi^2 / 2L_2 = \Phi^2 / 2\mu_0 R_u \ln R/r$ , а потери на кромках  $P_2 = W_2 \omega / Q_2 = \Phi^2 \omega \delta (R+r) / 4\mu_0 R_u R r (\ln R/r)^2$ . Из условия минимума потерь находим радиус кромок:  $r \approx 0,11R$ .

Размещение индуктора во внутренней камере установки "АМБАЛ" и его основные размеры показаны на рис.3. Внутренний радиус индуктора  $R_{и1} = 32$  см, наружный —

$R_{и2} = 33$  см. Высота индуктора  $Z = 48$  см, радиус кромок  $r \approx 1$  см. Учитывая приближенный характер расчетов, камеру в области индуктора аппроксимируем цилиндром с радиусом  $R_k = 46$  см. Относительное распределение энергий магнитного поля по трем участкам:

$$W_1 = \frac{\Phi^2}{2L_1} = \frac{\Phi^2 Z}{2\mu_0 \pi R_{и1}^2}; \quad W_2 = \frac{\Phi^2}{2\mu_0} R_{и1} \ln R/r; \quad W_3 = \frac{\Phi^2 Z}{2\mu_0 \pi (R_k^2 - R_{и2}^2)}; \quad \text{при указанных параметрах оказывается примерно равномерным: } W_1 \approx W_2 \approx W_3 = 1/3 W$$

Учитывая, что при частоте 25 кГц и температуре около 50°C толщина скин-слоя в меди  $\delta \approx 0,5$  мм, из приведенных выше формул находим добротность отдельных участков:  $Q_1 \approx 640$ ,  $Q_2 \approx 80$ ,  $Q_3 \approx 260$ . Суммарная добротность индуктора в камере  $Q_u$  определяется из соотношения:  $Q_u^{-1} = (Q_1^{-1} + Q_2^{-1} + Q_3^{-1})/3 \approx 6 \cdot 10^{-3}$ , т.е.  $Q_u \approx 167$ .

Основные потери происходят на кромках индуктора и составляют около 75% от общих потерь. Так как поверхность кромок мала, это может привести к их перегреву и возникновению больших термических напряжений. Пусть, например, на кромках выделяется в виде тепла мощность 0,5 МВт в течение времени  $\Delta t = 0,5$  сек. При тепловом скине  $\delta_T = \sqrt{\Delta t \lambda / c_v} \approx 0,7$  см перегрев  $\theta \approx 70^\circ\text{C}$  за импульс, а соответствующее механическое напряжение

$\sigma_0 = \theta \cdot \alpha \cdot E \approx 70 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \cdot 10^6 \approx 1200$  кг/см<sup>2</sup> ( $\alpha$  — коэффициент линейного расширения меди,  $E$  — ее модуль упругости). Как видно, термические напряжения очень велики. Поэтому кромки индуктора следует выполнять из хромистой бронзы. Напряжения можно несколько снизить за счет увеличения радиуса кромок, например, до 2 см. При длительности импульса 0,1 сек особых проблем с кромками уже не возникает. Лучшим, по-видимому, решением будет выполнение кромок в виде катушек, как это показано на рис.4. Такие катушки позволят увеличить добротность кромок в нес-

колько раз. В результате потери в них резко сократятся и, соответственно, возрастет к.п.д. нагрева плазмы. Кроме того, катушки могут расширяться при нагреве, не вызывая больших механических напряжений.

Определим теперь мощность, поглощаемую плазмой (электронами). Пусть добротность контура  $Q_k = 100$ , что легко осуществимо при самой простой конструкции индуктора ( $Q_u = 167$ ) и конусных конденсаторах ( $Q_c = 300$ ) Тогда реактивная мощность в системе  $P_p = 10^8$  Вт, а в плазме  $P_p' \approx P_p \cdot K (R_n/R_u)^2 / 3$ , где  $1/3$  — доля мощности в центральной части индуктора,  $K \approx 0,8$  — коэффициент, учитывающий ослабление поля к оси из-за малой длины индуктора,  $R_n = 25$  см — радиус плазмы,

$R_u = 32$  см — радиус индуктора. Отсюда  $P_p' \approx 1,6 \cdot 10^7$  Вт. Так как удельная реактивная мощность  $P_p'/V = \omega (\delta B)^2 / 8\pi$ , то из формулы (1) следует, что относительное поглощение  $Q_e V / P_p' = 8\pi n T_e / B_0^2 \cdot Fe(\omega T_e) / \omega T_e = \beta_e Fe(\omega T_e) / \omega T_e$ . При электронной температуре  $T_e = 200$  эВ, плотности плазмы  $n \approx 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и магнитном поле в центральной части установки  $B_0 \approx 1,5 \cdot 10^3$  Гс величина  $\beta_e \approx 3,5 \cdot 10^{-2}$ , а  $\omega T_e \approx 0,97$  (напомним, что  $f = \omega / 2\pi = 25$  кГц).

Отсюда полная мощность, поглощаемая электронами,  $W_e \approx 56$  кВт. Эта величина сравнима с мощностью, приобретаемой электронами в крайних пробкотронах установки "АМБАЛ" [2], так что такой подогрев электронов должен существенно повысить их температуру. Применяя катушки на кромках и более высокодобротные конденсаторы, можно, наверное, увеличить рассеяние мощности в плазме до 80–100 кВт. Правда, здесь уже наступают ограничения по пульсациям радиуса плазменного шнура. Амплитуда пульсаций  $\delta R_n$  связана с амплитудой переменного магнитного поля  $\delta B$  соотношением:  $\delta R_n / R_n = \delta B / 2B_0$ . При  $P_p' = 1,6 \cdot 10^7$  Вт  $\delta B \approx 0,5$  кГс, так что  $\delta R_n / R_n \approx 0,17$ . А увеличить радиус индуктора в существующей вакуумной камере установки почти невозможно.

Существенный прогресс в повышении эффективности

гирорелаксационного метода нагрева плазмы может быть достигнут только при разработке специальных камер и индукторов. Одна из возможных конструкций показана на рис.5. За счет удлинения индуктора можно охватить больший объем плазмы и уменьшить роль кромок. Благодаря большой камере резко снижается мощность в обратном магнитном потоке. Добротность на основных участках (1 и III, рис.2) здесь порядка 700-800, а на кромках - 300-400. Существенного увеличения добротности на кромках можно добиться с помощью катушек, намотанных специальным проводом (кабелем) типа лицендрат (рис.6). Они должны быть пропитаны, например, эпоксидным компаундом. Высокие вакуумные характеристики можно получить, в частности, следующими способами: (рис.6а) на поверхность катушки в вакууме нанести соответствующее покрытие; (рис.6б) катушку поместить в стеклянный тор 5, который может откачиваться форвакуумным насосом.

Особенно высокой добротности колебательного контура (больше  $10^3$ ) можно достигнуть на устройстве, изображенном на рис.7. Здесь индуктор расположен в отдельной полости с не очень высоким вакуумом. Благодаря этому существенно упрощается изготовление всей силовой цепи: обмоток, вводов и т.п. Конденсатор можно использовать газовый, имеющий добротность больше  $10^4$ . В этом устройстве более половины мощности генератора ( $> 0,5$  МВт) будет перекачиваться в плазму.

В заключение авторы выражают свою благодарность Д.Д.Рютову, по инициативе которого была выполнена эта работа, и Г.И.Димову за многочисленные полезные обсуждения.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Г.И.Димов. и др. "Физика плазмы", 2, 597, 1976.
- [2] Г.И.Димов. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 77-46, 1977.
- [3] С.И.Брагинский. В сб. "Вопросы теории плазмы", т.1, стр.183, 1963.
- [4] Г.Е.Векштейн. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 80-1980.

-119,

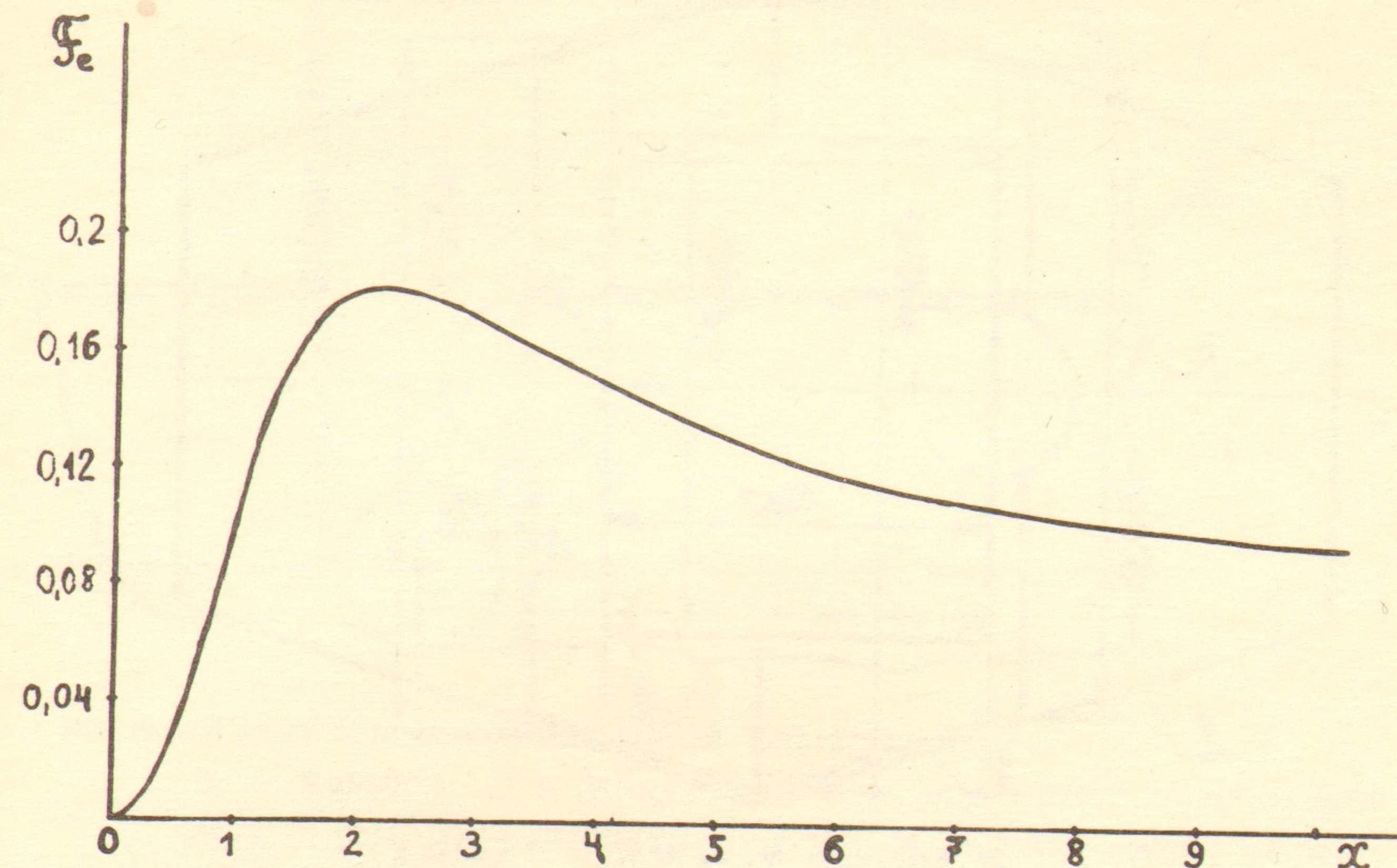


Рис.1. Зависимость мощности нагрева электронов от частоты переменного магнитного поля.

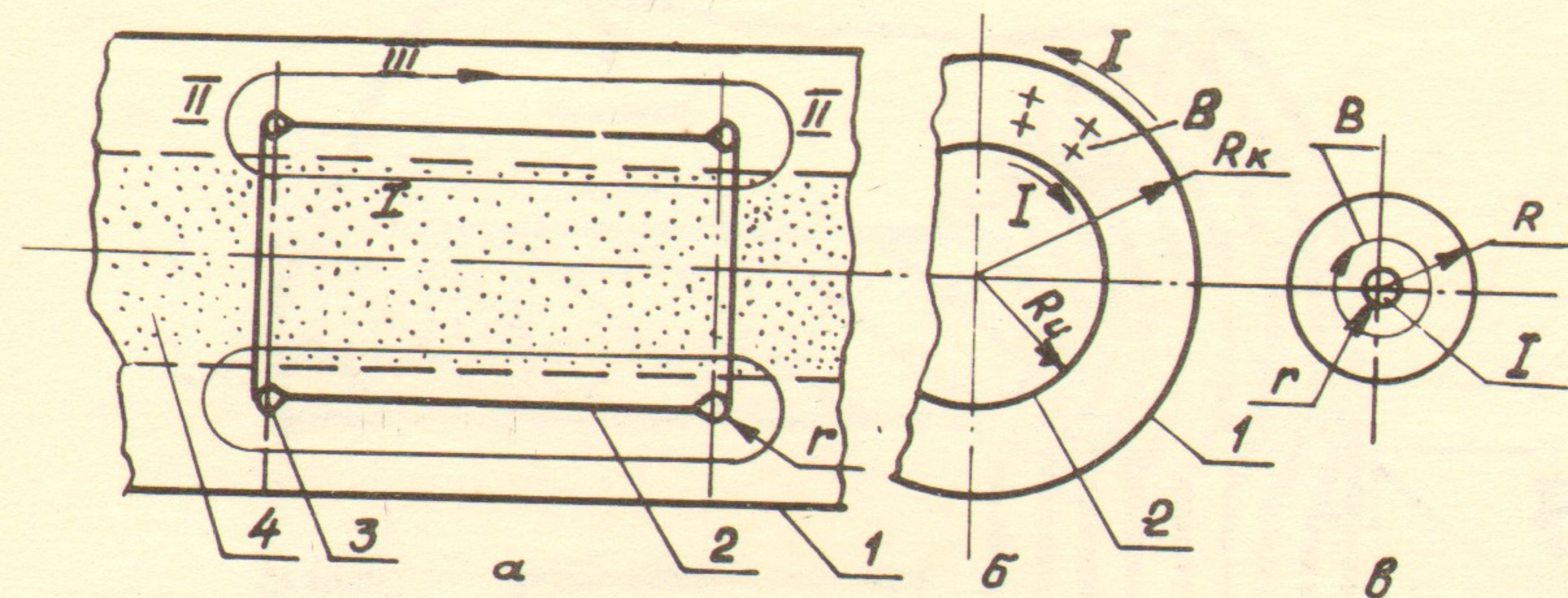


Рис.2. Схема устройства гирорелаксационного нагрева плазмы: а) продольный разрез, б) поперечный разрез, в) аппроксимация кромок индуктора коаксиалом. 1 - вакуумная камера, 2 - индуктор, 3 - кромка индуктора, 4 - плазма, B - магнитное поле, I - электрический ток,  $R = R_k - R_u$  - радиус воображаемого обратного проводника коаксиала.

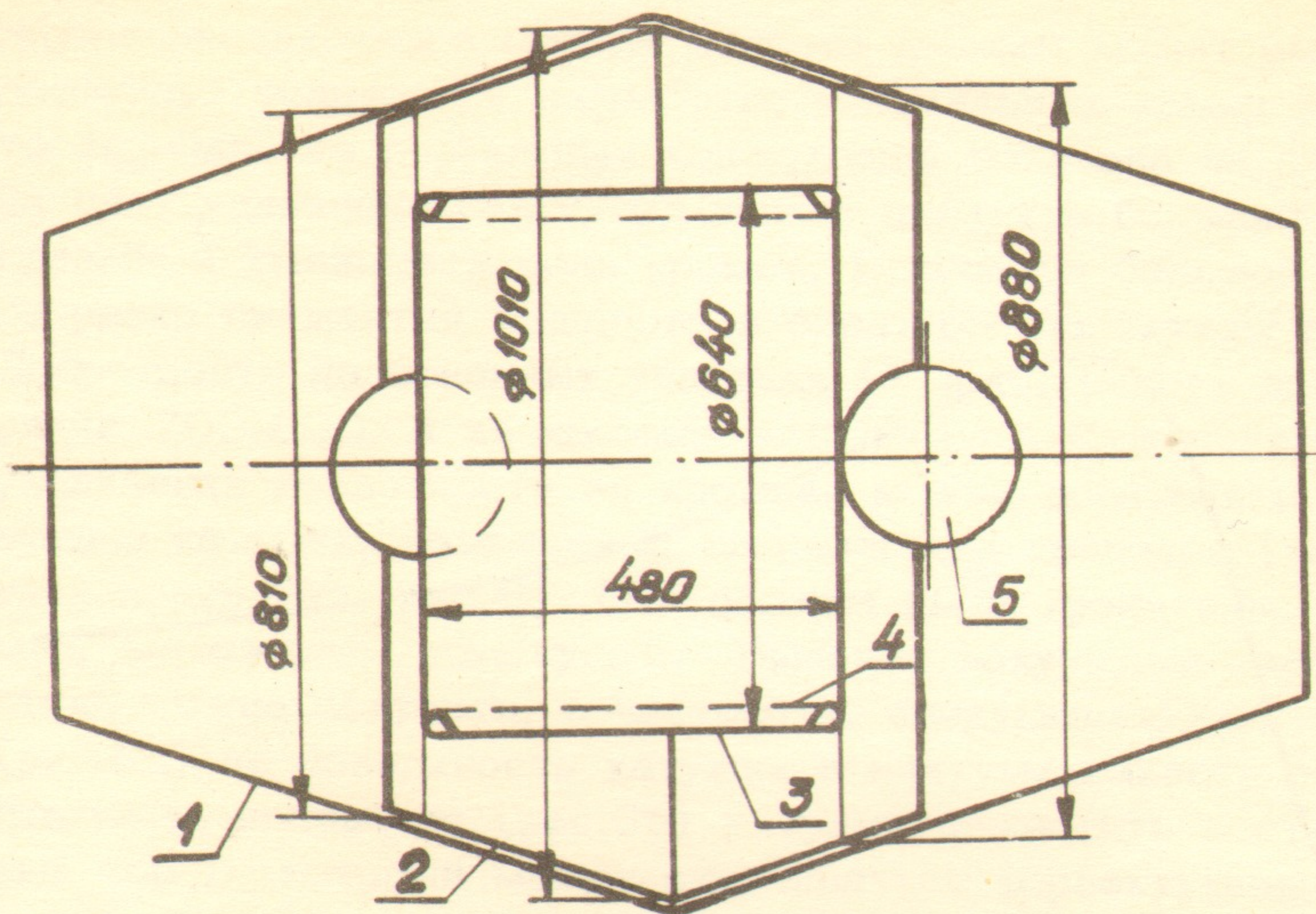


Рис.3. Индуктор в камере установки "АМБАЛ".  
1 - центральная часть камеры, 2 - медный экран,,  
3 - индуктор , 4 - ниобиевые ленты, 5 - окно камеры.

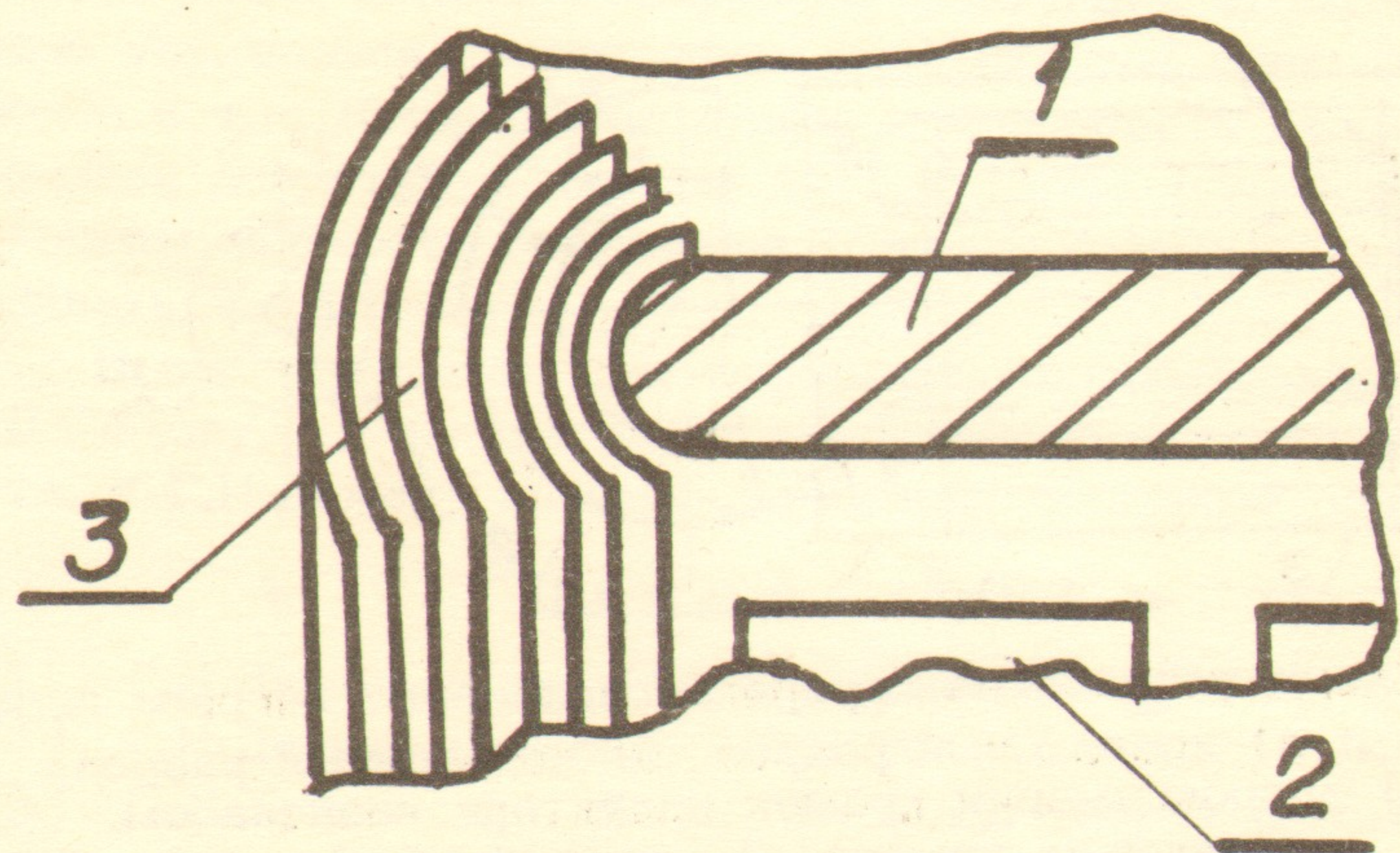


Рис.4. Кромка индуктора в виде вакуумной катушки из про-  
фильной ленты.  
1 - индуктор, 2 - ниобиевая лента, 3 - катушка.

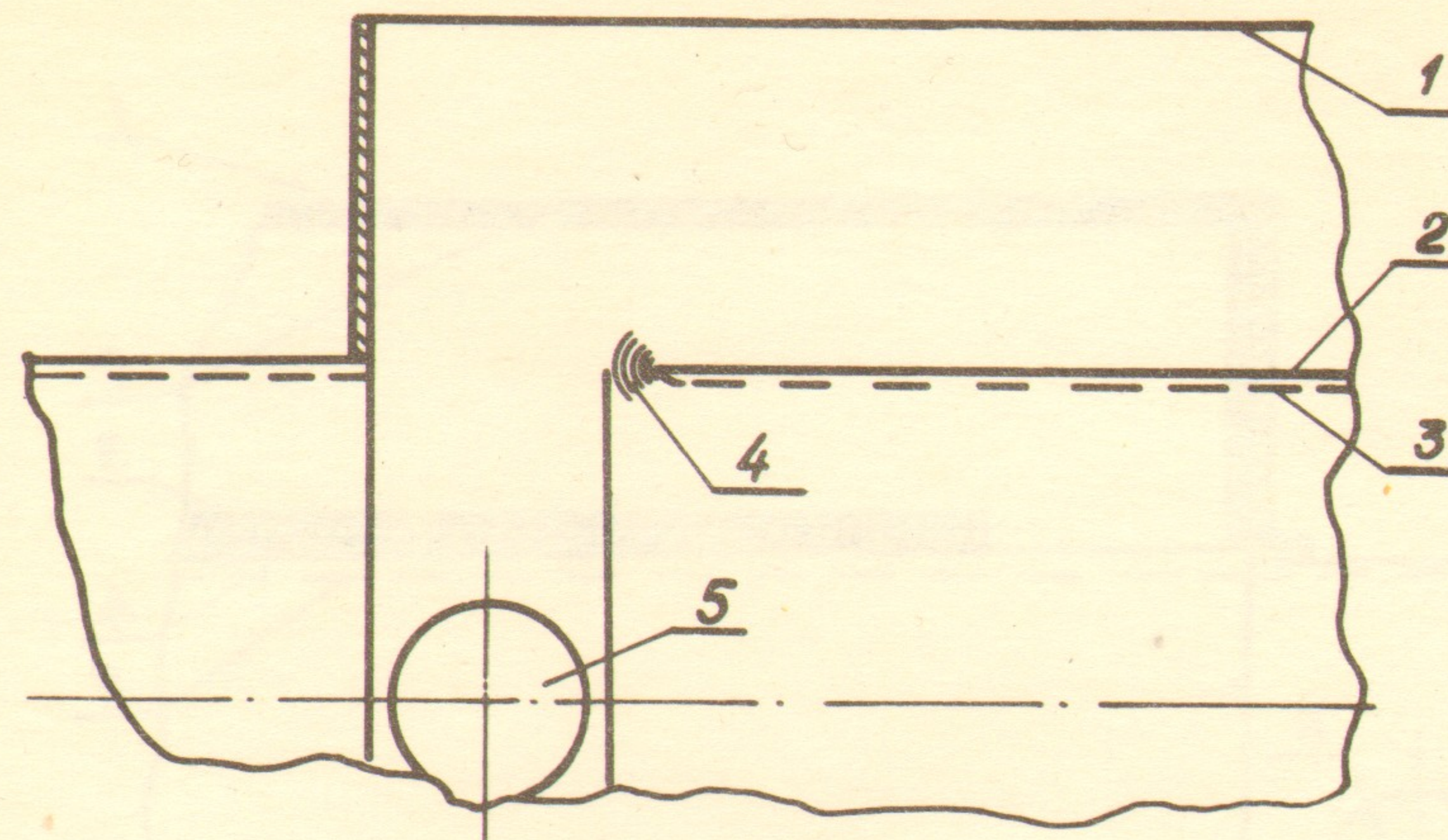


Рис.5. Индуктор в специальной камере.  
1 - камера, 2 - индуктор, 3 - водородопоглощающие  
элементы, 4 - кромка индуктора в виде вакуумной  
катушки (рис.4), 5 - окно камеры.

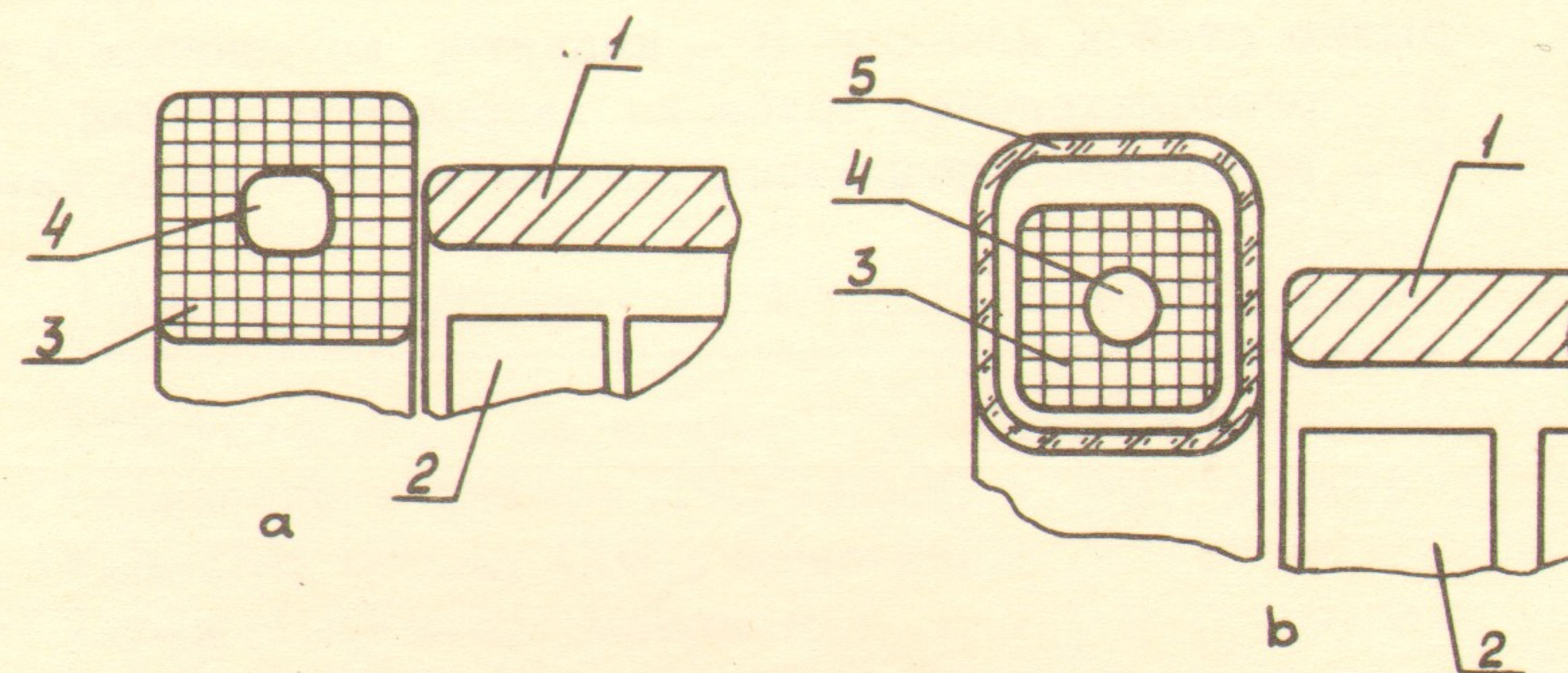


Рис.6. Варианты исполнения кромок индуктора в виде кату-  
шек.  
1 - индуктор, 2 - ниобиевая лента, 3 - катушка,  
4 - канал охлаждения, 5 - диэлектрический тор.

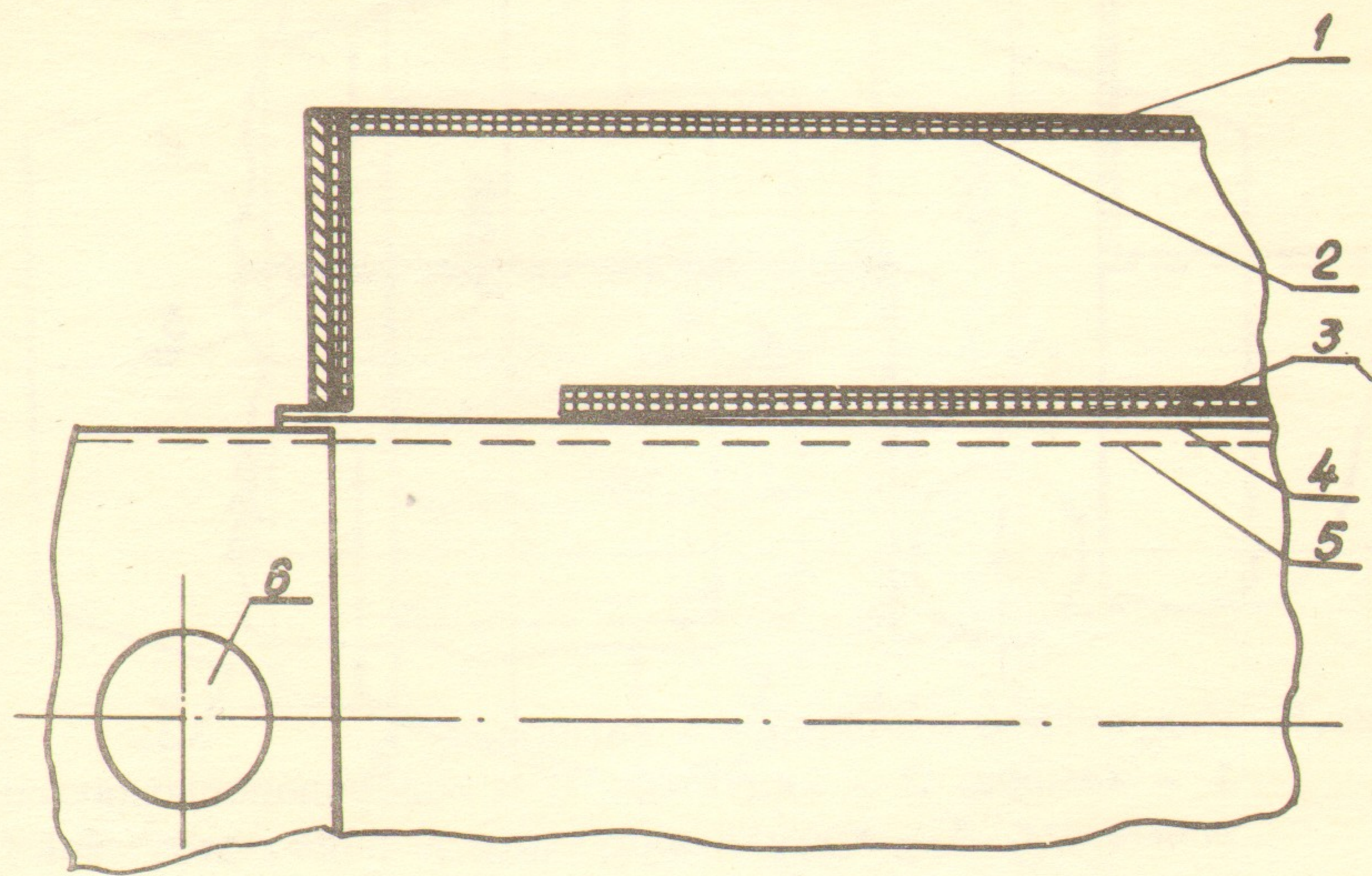


Рис. 7. Устройство с разделительной трубой.

- 1 - камера, 2 - многослойное токопроводящее покрытие стенок камеры, 3 - индуктор катушечного типа, 4 - разделительная труба из кварцевого стекла, 5 - водородопоглощающие элементы, 6 - окно камеры

Работа поступила - 15 апреля 1980 года

Ответственный за выпуск - С.Г. Попов  
 Подписано к печати 29.У-1980 г. МН 06811  
 Усл. 0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.  
 Тираж 150 экз. Бесплатно  
 Заказ № 144

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР