

МЕТОД  
Ч АСТОТНО-  
Г ЕОМЕТРИЧЕСКОЙ  
Ф ОКУСИРОВКИ  
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ  
ИНДУКЦИОННОМ  
КАРОТАЖЕ



НОВОСИБИРСК-1979

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ

**МЕТОД  
ЧАСТОТНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ  
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ИНДУКЦИОННОМ  
КАРОТАЖЕ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

НОВОСИБИРСК-1979

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе рассмотрены теоретические основы метода частотно-геометрической фокусировки (ЧГФ), позволяющего ослабить искажающее влияние токов проводимости на результаты измерений в диэлектрическом каротаже и повысить разрешающую способность методов ДИК по отношению к диэлектрической проницаемости пластов. Исследованы радиальные и вертикальные характеристики фокусирующих зондов ЧГФ, показана целесообразность использования установок с частотно-геометрической фокусировкой для изучения диэлектрической проницаемости пластов с пониженным удельным сопротивлением.

Составители

Ю.Н. Антонов, Л.А. Табаровский, И.М. Панич

Печатается по решению секции геофизики  
Ученого совета Института геологии  
и геофизики СО АН СССР

© Институт геологии  
и геофизики  
СО АН СССР, 1979г.

Подписано к печати 15.X.1979г. МН 03106.  
Бумага 60×84/16. Печ.л.3.0. Уч.-изд.л. 2.7.  
Тираж 190. Заказ 344. Цена 40 коп.

Институт геологии и геофизики СО АН СССР  
Новосибирск, 90. Ротапринт.

Диэлектрическая проницаемость горных пород в значительной мере определяется их коллекторскими свойствами, степенью насыщенности флюидами, вещественным составом и фазовым состоянием насыщающей компоненты. Поэтому данные о диэлектрической проницаемости пород, заполняющих околоскважинное пространство, играют важную роль в промышленной геофизике при выявлении нефтегазонасыщенных коллекторов и определении их продуктивности.

Измерение диэлектрической проницаемости в скважинах осуществляется методами диэлектрического индукционного каротажа (ДИК). Все методы ДИК основаны на измерении характеристик магнитного поля соосного скважине магнитного диполя и различаются между собой по одному или нескольким из следующих признаков:

1. Вид регистрируемых характеристик магнитного поля (амплитуды, фазы и различные функции этих величин);
2. Количество регистрируемых характеристик поля и, как следствие, число генераторных и измерительных элементов, входящих в состав зондирующего устройства;
3. Применяемый метод фокусировки.

В совокупности условий, обеспечивающих фокусировку, важнейшим фактором, общим практически для всех фокусирующих систем, является одинаковая зависимость величин, регистрируемых отдельными элементами установки, от параметров исключаемой помехи. При этом, если вклад помехи в сигнал аддитивен, то измеряют разностные величины, если искажающее влияние имеет мультипликативный характер, то измеряют относительные величины. Известно, что при определенных условиях (высокая частота, большая длина зонда) вертикальная компонента поля  $H_z$  вертикального магнитного диполя в скважине, пересекающей пласт неограниченной мощности, может быть представлена в виде [1]:

$$H_z = H_z^0 (\kappa_n L) / I_0^2 (\kappa_c a), \quad (B.1)$$

где  $H_z^0$  - вертикальная компонента поля вертикального магнитного диполя в однородной среде с параметрами пласта;

$$\kappa_c^2 = -\omega^2 \epsilon_c \mu - i \sigma_c \mu \omega$$

$$k_n^2 = -\omega^2 \epsilon_n \mu - i \tilde{\sigma}_n \mu \omega ;$$

$\omega$  - круговая частота поля;

$\mu$  - магнитная проницаемость среды;

$\epsilon_c$  - диэлектрическая проницаемость скважины;

$\epsilon_n$  - диэлектрическая проницаемость пласта;

$\tilde{\sigma}_c$  - проводимость скважины;

$\tilde{\sigma}_n$  - проводимость пласта;

$a$  - радиус скважины;

$L$  - длина зонда (расстояние от генераторного диполя до точки измерения поля);

$I_0$  - модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Очевидно, величину  $H_z$ , определяемую соотношением (B.1), можно представить в виде:

$$H_z = |H_z^0(k_n L)| e^{i(\varphi_L - \varphi_a)} / |I_0^2(k_c a)|, \quad (B.2)$$

где

$$\varphi_L = \text{Arq}(H_z^0(k_n L)); \quad \varphi_a = \text{Arq}(I_0^2(k_c a)).$$

Фаза  $\varphi_L$  не зависит от электрических и геометрических параметров скважины и совпадает с фазой поля двухэлементного зонда в однородной среде с параметрами пласта  $\epsilon_n$  и  $\tilde{\sigma}_n$ . Функция определяется параметрами скважины и не зависит от длины зонда. Как следует из (B.2), величина  $\varphi_a$  при измерении фазы поля является аддитивной помехой. Очевидно, что разность фаз  $d\varphi$ , измеренная двумя зондами различной длины:

$$d\varphi = \text{Arq}(H_z(L_2)) - \text{Arq}(H_z(L_1)) = \varphi(L_2) - \varphi(L_1),$$

зависит только от параметров пласта и легко может быть проинтерпретирована.

При измерении модуля поля помеха, связанная с искажающим влиянием скважины, является согласно (B.2), мультипликативной. Поэтому при регистрации отношения амплитуд, измеренных зондами различной длины, измеряемая величина не зависит от параметров скважины.

Наряду с геологическими помехами в виде скважины и зоны

проникновения, которые различными приемами фокусировки удается в той или иной мере исключить, во всех известных способах диэлектрического каротажа присутствует помеха физического характера, которая известными приемами фокусировки не устраняется и единственным известным в настоящее время способом преодоления которой является повышение частот. Такой помехой являются токи проводимости. Отметим, что возможность повышения частоты ограничивается двумя обстоятельствами. Во-первых, использование чрезмерно высоких частот приводит в силу скин-эффекта к сильному затуханию полей. Во-вторых, на частотах порядка 100 МГц возникают трудности в технической реализации способов диэлектрического каротажа, в частности, становятся практически неприемлемыми индукционные датчики магнитного поля, выполненные в виде катушек.

Целью настоящей работы является изложение метода частотно-геометрической фокусировки (ЧГФ), позволяющего существенно ослабить искажающее влияние токов проводимости в индукционном диэлектрическом каротаже и тем самым расширить (прежде всего, в область низкоомных разрезов) класс геоэлектрических условий, в которых возможно определение диэлектрической проницаемости горных пород методами скважинной электротомии.

## § I. Устранение искажающего влияния токов проводимости в индукционном диэлектрическом каротаже (частотно-геометрическая фокусировка)

Рассмотрим выражение для поля магнитного диполя с моментом  $M$  в однородной среде:

$$H_2 = (M/2\pi L^3) e^{-kL} (1 + kL) \quad (I.1)$$

Если обозначить через  $m$  реальную часть, а через  $n$  мнимую часть выражения  $kL$ , то

$$h_2 = e^{-kL} (1 + kL) = e^{-m} \left\{ [(1+m)\cos n + n\sin n] + i [n\cos n - (1+m)\sin n] \right\} \quad (I.2)$$

Выражения для  $m$  и  $n$  через обобщенные параметры

$$\rho = \sqrt{\omega \mu \delta / 2} L \quad (I.3)$$

$$\nu = \omega^2 \mu \varepsilon L^2 / 2$$

имеет следующий вид:

$$m = \sqrt{\rho^4 + \nu^2 - \nu}; \quad n = -\sqrt{\rho^4 + \nu^2 + \nu}. \quad (I.4)$$

Рассмотрим первые два члена ряда Тейлора для  $h_z$  как функции от  $\nu$  :

$$h_z(\rho, \nu) \approx h_z(\rho, 0) + \nu \frac{\partial}{\partial \nu} h_z(\rho, 0) \quad (I.5)$$

Так как

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \nu} h_z &= -e^{-kL} (1 + kL) \frac{\partial}{\partial \nu} (kL) + e^{-kL} \frac{\partial}{\partial \nu} (kL) = \\ &= -e^{-kL} \frac{\partial}{\partial \nu} \left( \frac{k^2 L^2}{2} \right) = -e^{-kL}, \end{aligned} \quad (I.6)$$

то

$$h_z(\rho, \nu) \approx \tilde{h}_z(\rho) + \nu e^{-\rho(1-i)} \quad (I.7)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \tilde{h}_z(\rho) &= e^{-\rho} \left\{ [(1+\rho)\cos\rho + \rho\sin\rho] + \right. \\ &\quad \left. + i[-\rho\cos\rho + (1+\rho)\sin\rho] \right\} \end{aligned} \quad (I.8)$$

При условии

$$\nu = \omega \varepsilon / \delta \ll 1 \quad (I.9)$$

величину  $\tilde{h}_z$  можно понимать как часть магнитного поля, порождаемую токами проводимости, а второе слагаемое в правой части (I.7) — как часть магнитного поля, обусловленную токами смещения. Относительный вклад токов смещения по сравнению с токами проводимости в суммарное магнитное поле определяется соотноше-

нием:

$$\delta = \left| \frac{\gamma e^{-\rho(1-l)}}{\tilde{h}_2(\rho)} \right| = \frac{\gamma}{\sqrt{(1+\rho)^2 + \rho^2}} \quad (I.10)$$

Из (I.10) следует, что при малых значениях безразмерного параметра  $\delta$  (низкие частоты, небольшие значения диэлектрической проницаемости, невысокие удельные сопротивления пород) чувствительность известных способов диэлектрического каротажа к исследуемой характеристике среды становится слабой.

С целью уменьшения влияния токов проводимости на измеряемые характеристики поля, рассмотрим два двухэлементных зонда разной длины  $L_1$  и  $L_2$ , в которых генераторные диполи с моментами  $M_1$  и  $M_2$  питаются токами различных частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Предположим, что параметры среды и установки удовлетворяют условиям (I.9). Из (I.1), (I.7) для каждого из зондов получаем:

$$H_2(\omega_1, L_1) = \frac{M_1}{2\sqrt{\pi} L_1^3} [\tilde{h}_2(\rho_1) + \gamma_1 e^{-\rho_1(1-l)}], \quad (I.11)$$

$$H_2(\omega_2, L_2) = \frac{M_2}{2\sqrt{\pi} L_2^3} [\tilde{h}_2(\rho_2) + \gamma_2 e^{-\rho_2(1-l)}], \quad (I.12)$$

где

$$\rho_j = \sqrt{\omega_j \mu \delta / 2} L_j \quad (I.13)$$

$$\gamma_j = \omega_j^2 \epsilon \mu L_j^2 / 2 \quad (I.14)$$

$$j = 1, 2$$

Подчиним моменты, частоты и длины условиям:

$$M_2/M_1 = (L_2/L_1)^3 \quad (I.15)$$

$$\omega_1/\omega_2 = (L_2/L_1)^2 \quad (I.16)$$

Если при условиях (I.15), (I.16) определить разность характеристик поля, измеряемых каждым зондом (например, разность амплитуд,



фаз или любых других одинаковых функций поля), то эта разность будет пропорциональна величине  $(\gamma_1 - \gamma_2)$ , а, следовательно, и диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ . Действительно, при соблюдении условий (I.I5), (I.I6) выполняются соотношения

$$\rho_1 = \rho_2; \quad M_1 / (2\pi L_1^3) = M_2 / (2\pi L_2^3); \quad \gamma_1 \neq \gamma_2,$$

означающие, что в точках расположения измерительных элементов каждого зонда вклады токов проводимости в суммарное магнитное поле одинаковы, а вклады токов смещения различаются между собой. Поэтому при образовании разности любых одинаковых функций полей  $H_z(\omega_1, L_1)$  и  $H_z(\omega_2, L_2)$  слагаемые, связанные с магнитным полем токов проводимости, будут взаимно уничтожаться, что легко доказывается в каждом конкретном случае соответствующим разложением рассматриваемых функций в ряды Тейлора по параметрам  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$ . Например, рассмотрим случай, когда измеряется разность амплитуд

$$\Delta H = |H_z(\omega_1, L_1)| - |H_z(\omega_2, L_2)| \quad (I.I7)$$

Очевидно,

$$|H_z(\omega_j, L_j)| = \sqrt{|u_j|^2 + |v_j|^2 - 2|u_j||v_j|\cos(\varphi_{u_j} - \varphi_{v_j})}, \quad (I.I8)$$

где

$$u_j = (M_j / (2\pi L_j^3)) \tilde{h}_z(\rho_j) \quad (I.I9)$$

$$v_j = (M_j / (2\pi L_j^3)) \gamma_j e^{-\rho_j(1-i)} \quad (I.20)$$

$$\varphi_{u_j} = \text{Arg } u_j \quad (I.21)$$

$$\varphi_{v_j} = \text{Arg } v_j \quad (I.22)$$

Из условий (I.I5), (I.I6) следует:

$$|u_1| = |u_2|; \quad \varphi_{u_1} = \varphi_{u_2}; \quad \varphi_{v_1} = \varphi_{v_2}.$$

Полагая  $|u_j| \neq 0$ ,  $\varphi_{u_j} - \varphi_{v_j} \neq \pi/2$  и опуская индексы в обозначениях  $u_j$ ,  $\varphi_{u_j}$ ,  $\varphi_{v_j}$ ,  $\rho_j$ , получим из (I.I8) с точностью до членов первого порядка малости:

$$|H_z(\omega_j, L_j)| = |u|(1 - (|v_j|/|u|)\cos(\varphi_u - \varphi_{v_j})) =$$

$$= |u| + |v_j| \cos(\varphi_u - \varphi_v).$$

Отсюда

$$\partial H = \frac{M_1}{2\pi L_1^3} e^{-\rho} (v_1 - v_2) \cos(\varphi_u - \varphi_v) \quad (I.23)$$

Из соотношения (I.23) следует, что разность модулей пропорциональна величине  $(v_1 - v_2)$ . Аналогичное утверждение можно доказать при измерении любых других функций поля  $H_z$ .

Рассмотрим как осуществляется фокусировка магнитного поля токов проводимости в случае использования многоэлементных зондов. Будем рассматривать линейные зонды, т.е. такие системы, в состав которых при наличии нескольких измерительных элементов входит только один генераторный диполь, либо при наличии нескольких генераторов входит только один измерительный датчик. Для определенности положим, что зонд содержит один измерительный элемент и  $m$  генераторов с моментами  $M_1, \dots, M_m$ . Будем обозначать такой зонд через  $Z_1$ . Очевидно, что в составе зонда  $Z_1$  имеется  $m$  двухэлементных зондов, длины которых обозначим через  $L_1^{(1)}, \dots, L_m^{(1)}$ . Круговая частота возбуждающего тока во всех генераторах —  $\omega_1$ . В обозначениях измеряемых величин условимся указывать в качестве аргумента наименование зонда ( $Z_1$ ), отмечая тем самым зависимость этих величин от параметров  $\omega_1, L_1^{(1)}, \dots, L_m^{(1)}, M_1^{(1)}, \dots, M_m^{(1)}$ . Суммарное магнитное поле в точке измерения можно представить следующим образом:

$$H_z(z_1) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^m \frac{M_j^{(1)}}{(L_j^{(1)})^3} [\tilde{h}_z(\rho_j^{(1)}) + v_j \omega e^{-\rho_j^{(1)}(1-i)}], \quad (I.24)$$

где

$$\rho_j^{(1)} = \sqrt{\omega_1 \mu \delta / 2} L_j^{(1)} \quad (I.25)$$

$$v_j^{(1)} = \omega_1^2 \epsilon \mu (L_j^{(1)})^2 / 2; \quad j=1, \dots, m. \quad (I.26)$$

Рассмотрим ( $m+1$ ) элементный зонд  $Z_2$ , у которого все

линейные размеры изменены по сравнению с линейными размерами зонда  $Z_1$  в  $\alpha$  раз:

$$L_j^{(2)}/L_j^{(1)} = \alpha; \quad j = 1, \dots, m.$$

Зонды  $Z_1$  и  $Z_2$  будем называть геометрически подобными, а величину  $\alpha$ , в соответствии с общепринятой терминологией, будем называть коэффициентом геометрического подобия второго зонда относительно первого. Частоту возбуждающих токов в зонде  $Z_2$  обозначим через  $\omega_2$ . В точке расположения измерительного датчика зонда  $Z_2$  магнитное поле определяется равенством:

$$H_z(z_2) = \frac{1}{2\pi} \sum_{j=1}^m \frac{M_j^{(2)}}{(L_j^{(2)})^3} [\tilde{h}_z(\rho_j^{(2)}) + \gamma_j^{(2)} e^{-\rho_j^{(2)}(1-i)}] \quad (I.27)$$

Величины  $\rho_j^{(2)}$ ,  $\gamma_j^{(2)}$  имеют вид, аналогичный (I.25), (I.26). Если положить

$$M_j^{(2)}/M_j^{(1)} = \alpha^3 \quad (I.28)$$

$$\omega_1/\omega_2 = \alpha^2, \quad (I.29)$$

то нетрудно показать, что также, как и в случае двухэлементных зондов разность любых двух одинаковых характеристик магнитного поля, измеренных каждым из геометрически подобных зондов с параметрами, удовлетворяющими условиям (I.28), (I.29), пропорциональна диэлектрической проницаемости среды.

Характер зависимости измеряемой величины от физических параметров разреза определяет разрешающую способность соответствующего метода по отношению к этим параметрам. Введем количественную меру разрешающей способности (или чувствительности) методов диэлектрического каротажа по отношению к диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon$ . Пусть при изменении диэлектрической проницаемости на величину  $\Delta\epsilon$  измеряемая величина  $f$  получает приращение  $\Delta f$ . Очевидно, параметр  $\zeta$ , определяемый соотношением

$$\zeta = \frac{\Delta f/f}{\Delta\epsilon/\epsilon}, \quad (I.30)$$

характерирует разрешающую способность метода. При  $\Delta \varepsilon \rightarrow 0$

$$\zeta \rightarrow \frac{d \ln f}{d \ln \varepsilon} \quad (I.31)$$

Следовательно, величина  $\zeta$  есть тангенс угла наклона графика  $f(\varepsilon)$ , изображенного в билогарифмическом масштабе.

На рисунках I-2 приведены значения  $\delta^2 h = \delta^2 H(2\sqrt{L_1^3/M_1})$  и  $\delta^2 \varphi = \text{Ar} \varphi H(z_1) - \text{Ar} \varphi H(z_2)$  для трехэлементного зонда с коэффициентом геометрического подобия  $\alpha = \sqrt{2}$ . По оси абсцисс отложены значения параметра  $V = \omega_1 \varepsilon / \delta$ . Шифр кривых  $\rho$ . Из сопоставления с расчетами амплитудно-фазовых характеристик двухэлементных зондов ДИК (рис.3-4) следует, что разностная характеристика поля, построенная по результатам измерений двумя двухэлементными зондами, параметры которых удовлетворяют условиям (I.15), (I.16), обладает лучшей разрешающей способностью по отношению к диэлектрической проницаемости среды. Это подтверждается и расчетами чувствительности  $\zeta$  амплитудных и фазовых характеристик, представленными на рисунках 5-6. Вся область параметров с практически нулевой чувствительностью у двухэлементного зонда (рис.7-8) становится областью со значениями  $\zeta$  не менее единицы для зондов с частотно-геометрической фокусировкой токов проводимости.

Разностные характеристики для пятиэлементных зондов (рис. 9), включающих трехэлементный зонд индукционного диэлектрического каротажа и зонд, геометрически ему подобный с коэффициентом подобия  $\alpha = \sqrt{2}$ , представлены на рисунках 10-12. Здесь

$$\Delta h_1 = dh_1(z_1) - dh_1(z_2)$$

$$\Delta h_2 = dh_2(z_1) - dh_2(z_2)$$

$$\Delta \varphi = d\varphi(z_2) - d\varphi(z_1)$$

$$dh_1(z_1) = \left| \frac{h_2(L_1) - h_2(L_2)}{h_2(L_1)} \right|_{\omega = \omega_1}$$

$$dh_2(z_1) = \left| \frac{h_z(L_1) - h_z(L_2)}{h_z(L_2)} \right|_{\omega = \omega_1}$$

$$\Delta \varphi(z_1) = [\varphi(L_2) - \varphi(L_1)]_{\omega = \omega_1}$$

Аналогично через параметры трехэлементного зонда  $z_2$  определяются величины  $dh_1(z_2)$ ,  $dh_2(z_2)$ ,  $d\varphi(z_2)$ . На рисунках I3-I5 и I6-I8 представлены графики чувствительности соответственно пятиэлементных зондов ЧФ и трехэлементных фокусирующих зондов ДИК.

## § 2. Трехэлементный зонд ЧФ в однородной среде

Более детальное изучение зондов с частотно-геометрической фокусировкой начнем с изучения влияния коэффициента  $\alpha$  на величину измеряемого сигнала

$$\delta h = |h_z(\omega_1, L_1)| - |h_z(\omega_1/\alpha^2, L_1 \cdot \alpha)|$$

Как показывают расчеты, изменение  $\alpha$  практически не влияет на форму кривых, отражающих зависимость амплитудных и фазовых характеристик от параметра  $V$ . Однако, общий уровень сигнала возрастает с увеличением  $\alpha$ . На рисунке I9 в качестве примера изображены графики зависимости  $\delta h$  от параметра  $\alpha$  при фиксированном значении параметра  $V = 1$ . Шифр кривых -  $\rho$ . Наиболее резко измеряемая величина возрастает до  $\alpha^2 \approx 2$ , после чего рост сигнала с увеличением  $\alpha$  замедляется. При выборе  $\alpha$ , кроме необходимости обеспечить возможно больший уровень сигнала, следует принимать во внимание требование достаточной компактности установки. В этом смысле значение  $\alpha^2 = 2$  является вполне приемлемым. Во всех дальнейших расчетах отношение частот в установках ЧФ полагалось равным 2, а коэффициент геометрического подобия принимался равным, соответственно,  $\sqrt{2}$ . Графики разностной амплитуды и разности фаз для  $\alpha = \sqrt{2}$  приведены на рисунках I-2.

Рассмотрим зависимость доступных измерению диапазонов удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости однородной среды от конструктивных параметров зонда: частоты и длины установки. Предположим, что минимальный сигнал, доступный для регистрации с необходимой точностью, составляет  $\tau$  единиц измеряемой характеристики. При амплитудных измерениях эту величину целесообразно выражать в единицах прямого поля, при фазовых — в радианах. Тогда, в силу монотонной зависимости амплитудных и фазовых характеристик от параметра  $V$ , для каждого фиксированного значения  $\rho$  можно определить минимальное значение  $V_{min}$ , начиная с которого измеряемый сигнал имеет уровень не ниже  $\tau$ . Задавая различные уровни  $\tau$ , можно получить сеть значений  $V_{min}$  как функцию от  $\rho$ . Перейдя от параметров  $\rho$  и  $V$  к величинам  $L_1^2 f_M^2 \epsilon^*$  и  $L_1^2 f_M / \rho$  ( $f_M$  — частота короткого зонда, выраженная в мегагерцах), получаем графики, изображенные на рис.20 для разностных амплитуд  $\delta h$  и на рис.21 для разности фаз  $\delta \varphi$ . Шифр кривых — уровень минимального сигнала, регистрируемого аппаратурой. Эти кривые дают возможность определить при фиксированной длине зонда  $L_1$  и частоте  $f_M$  необходимую точность регистрации сигнала в области параметров среды, соответствующей нижним границам диапазонов исследования по диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$  и удельному сопротивлению  $\rho$ . Например, для зонда с расстоянием между источником и ближайшей точкой измерения  $L_1 = 1$  м на частоте 10 МГц в пласте с  $\epsilon^* = 10$ ,  $\rho = 10$  Ом.м:

$$L_1^2 f_M^2 \epsilon^* = 1000$$

$$L_1^2 f_M / \rho = 1.$$

Эта точка лежит на рис.20 между кривыми с шифрами 0,01 и 0,02 и на рис.21 между кривыми с шифрами 0,01 и 0,02. Следовательно, соответствующая аппаратура должна обеспечивать регистрацию с необходимой точностью сигнала величиной 0,01 единиц прямого поля при амплитудных измерениях и 0,01 радиана при фазовых. На частоте 50 МГц в том же пласте имеем:

$$L_1^2 f_M^2 \epsilon^* = 25000,$$

$$L_1^2 f_M / \rho = 5,$$

и требования к аппаратуре уже изменяются: 0,03 единиц прямого поля и 0,3 радиана. При этом можно будет определять диэлектрическую проницаемость пластов с  $\epsilon^* \geq 10$ , если их удельное сопротивление не ниже 10 Ом.м.

Зафиксируем нижнее значение диапазона изменения удельного сопротивления и диэлектрической проницаемости среды и будем считать, что  $L_1 = 1$  м. Тогда точки  $\{L_1^2 f_M^2 \epsilon^*, L_1^2 f_M / \rho\}$  при изменении  $f_M$  будут образовывать прямую линию. На рис. 20 и 21 нанесены в качестве примера две такие линии, соответствующие  $\rho = 50$  Ом.м,  $\epsilon^* = 20$  (линия I) и  $\rho = 10$  Ом.м,  $\epsilon^* = 5$  (линия II). Цифры вдоль линии означают частоту в мегагерцах. Анализируя рисунки 20 и 21 можно прийти к следующим выводам:

1. С увеличением частоты требования к чувствительности аппаратуры снижаются. Исключением служит разностная амплитуда  $\delta h$  в средах с  $L_1^2 f_M / \rho = 5$ , когда начиная с некоторой частоты (рис. 20 линия II, точка 50) дальнейшее ее увеличение не приводит к пересечению с линиями одинакового уровня. Во всех остальных случаях, особенно для фазовых измерений, наблюдается заметное снижение метрологических требований с ростом частоты.

2. Уменьшение нижней границы диапазона измеряемых значений  $\rho$  и  $\epsilon^*$  повышает требования к аппаратуре. Уменьшение  $\rho$  означает сдвиг прямых типа I, II вправо, уменьшение  $\epsilon^*$  — сдвиг вниз. При этом заметно, что для амплитудных измерений уменьшение  $\epsilon^*$  приводит к более резкому усилению требований к точности регистрации, чем уменьшение  $\rho$ ; для фазовых измерений имеет место обратное.

3. Если считать, что параметры однородного пласта изменяются в диапазоне

$$10 \text{ Ом.м} \leq \rho < \infty$$

$$5 \leq \epsilon^* \leq 80,$$

то при частоте  $f_M = 20$  МГц метровый зонд должен обладать чувствительностью 0,01 единиц прямого поля при амплитудных измерениях или порядка 0,02 радиана при фазовых.

Графики на рис. 20 и 21 позволяют определять метрологические требования к зонду фиксированной длины и с фиксированной рабочей частотой. Но можно поставить задачу определения необходимой частоты или длины зонда при известных метрологических возможностях регистрирующей аппаратуры. Эту задачу удобно решать с помощью рис. 22, 23. Здесь по оси абсцисс отложены значения  $\rho \epsilon^* f_M$ , по оси ординат — величина  $L_1 / \rho \sqrt{\epsilon^*}$ . Цифры кривых — уровень сигнала. Рис. 22 соответствует разностной амплитуде  $\delta h$ , рис. 23 — разности фаз  $\delta \varphi$ . По приведенным графикам

кам удобно определять параметры зонда: длину и частоту, если известны параметры среды и задана точность регистрации. Например, если среда имеет сопротивление  $\rho = 10 \text{ Ом.м}$ , относительную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon^* = 25$ , то при чувствительности метрового зонда 0,02 единиц прямого поля (амплитудные измерения) необходима частота не менее 6 МГц для того, чтобы измерить диэлектрическую проницаемость среды. Та же минимальная частота получается в случае фазовых измерений, если предположить, что минимальный регистрируемый сигнал составляет 0,02 радиан. Как видно из графиков, увеличение длины зонда приводит к снижению минимальных необходимых частот, что обусловлено увеличением расстояния между точками регистрации величин, образующих разностную характеристику.

О возможностях интерпретации одновременно замеренных разностной амплитуды и сдвига фаз у трехэлементного зонда ЧМ можно судить по рис.24. Представленная на этом рисунке палетка позволяет по показаниям зонда известной длины и работающего на известной частоте определять удельное сопротивление и диэлектрическую проницаемость пласта. Взяв на поле палетки точку с абсциссой  $\delta h$  и ординатой  $\delta \varphi$ , определяем по шифрам пересекающихся в этой точке кривых величины  $L_1^2 f_M^2 \epsilon^* = \mathcal{X}$  и  $L_1^2 f_M / \rho = \chi$ . Отсюда легко определить параметры среды:

$$\epsilon^* = \frac{\mathcal{X}}{L_1^2 f_M^2}$$

$$\rho = \frac{L_1^2 f_M}{\chi}$$

Значения разностной амплитуды и разности фаз получаются с некоторыми погрешностями, и поэтому на плоскости графика 24 следует наносить не точку  $(\delta h, \delta \varphi)$ , а прямоугольник с центром в этой точке и сторонами, равными удвоенным абсолютным погрешностям. Тот факт, что кривые семейства  $L_1^2 f_M^2 \epsilon^* = \text{const}$ , в отличие от кривых семейства  $L_1^2 f_M / \rho = \text{const}$ , расположены на всем поле палетки практически с равным шагом, свидетельствует о возможности более точного определения диэлектрической проницаемости среды по сравнению с ее удельным сопротивлением. С ростом удельного сопротивления кривые семейства  $L_1^2 f_M / \rho = \text{const}$  сливаются, что приводит к большим погрешностям в определении удельного сопротивления  $\rho$ .



### § 3. Пятиэлементный зонд ЧГФ в однородной среде

Пятиэлементные зонды с частотно-геометрической фокусировкой уже рассматривались в § I для иллюстрации высокой чувствительности метода ЧГФ к диэлектрической проницаемости среды. Там же приведены результаты расчетов разностных характеристик для пятиэлементных зондов ЧГФ с коэффициентом геометрического подобия  $\alpha = \sqrt{2}$  при  $L_2/L_1 = 1.2$  (рис.10-15). В данном параграфе более детально проводится сравнение пятиэлементных зондов ЧГФ с зондами ДМК, исследуется влияние конструктивных параметров пятиэлементных зондов на измеряемые характеристики.

Исследование влияния коэффициента подобия  $\alpha$  на величину сигнала пятиэлементной установки показывает, что так же как и в случае трехэлементного зонда, увеличение  $\alpha$  ведет к возрастанию сигнала, но требование компактности установки ограничивает рост  $\alpha$ . Как и в трехэлементном зонде, полагаем  $\alpha = \sqrt{2}$ . Кроме величины  $\alpha$ , в пятиэлементных зондах появляется еще один конструктивный параметр - относительная база зонда  $\beta = (L_2 - L_1)/L_1$ . На рис.25-27 при фиксированном  $V = 1$  приводятся значения  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$ ,  $\Delta \varphi$  для различных значений  $\beta$ . Шифр кривых -  $\beta_1 = \sqrt{\omega \mu \delta / 2} L_1$ . Данные рисунков свидетельствуют о пропорциональном росте сигнала с ростом  $\beta$ . Обычно база зондов метровой длины принимается равной 0,2-0,3 м. Для исследования была выбрана относительная база  $\beta = 0,2$ .

Как показывают расчеты, иллюстрируемые рис.10-12, величины  $\Delta h_1$ ,  $\Delta h_2$ ,  $\Delta \varphi$  меняются в довольно широком диапазоне значений. Подобно тому, как это было сделано для трехэлементных зондов ЧГФ, на рис.28-33 приводятся для пятиэлементных зондов ЧГФ графики, позволяющие для заданного диапазона параметров среды определять метрологические требования к измерительной аппаратуре (при известной длине самого короткого зонда  $L_1$  и частоте генератора, рис.28-30) или частоту колебаний и длину зонда при известном минимальном уровне регистрируемого сигнала (рис.31-33). Кроме того, на рис.28-30 нанесены линии одинакового уровня чувствительности  $\beta$  (штрих-пунктир) и равного уровня сигнала  $\tau$  (пунктир) для трехэлементного зонда ДМК с  $L_2/L_1 = 1,2$ . Они определяют область значений  $\rho$  и  $\beta^*$ , которые при фиксированных частотах и размерах зонда могут быть определены данными ме-

тодами. Например, если допустить, что аппаратура ДИК позволяет регистрировать величину сигнала не ниже 0,05 единиц прямого поля для амплитудных или 0,05 радиан для фазовых измерений, и при этом потребовать, чтобы чувствительность к изменению  $\epsilon^*$  была не ниже 0,5, то область допустимых для трехэлементного зонда ДИК параметров будет лежать в секторе А - С, образованном на рис.28-30 пересечением кривых  $\epsilon = 0,05$  и  $\zeta = 0,5$ . Эта область расширяется с повышением точности аппаратуры и понижением требованиям к разрешающей способности метода. При заданном минимальном уровне сигнала  $\epsilon$  для пятиэлементных зондов ЧГФ областью параметров, характеризующих доступные исследования разрезы, будет совокупность точек, лежащих выше линии с шифром  $\zeta$ . Например, для  $\epsilon = 0,05$  это область В-С на рис.28-30. Области допустимых параметров среды для зондов ДИК и ЧГФ не совпадают. Если из области допустимых параметров одного метода исключить те точки, которые попадают в область допустимых параметров другого метода (область С на рисунках), то оставшаяся часть будет областью параметров, где предпочтительно применение первого метода.

Как следует из расчетов чувствительности зондов ЧГФ (рис. I3-I5), величина  $\zeta$  во всем рассматриваемом диапазоне параметров не ниже 0,5, и поэтому при сравнении двух методов будем считать, что и зонды ДИК должны обладать чувствительностью  $\zeta = 0,5$ . На рис.28-30 в качестве примера заштрихованы области, предпочтительные для каждого метода при  $\epsilon = 0,05$ . В области А предпочтительнее применение зондов ДИК, в области В - применение зондов ЧГФ. Для каждой конкретной установки можно указать такое значение  $\bar{\rho}$ , что для  $\rho < \bar{\rho}$  диапазон доступных измерений зондами ЧГФ значений диэлектрической проницаемости среды будет шире соответствующего диапазона для зондов ДИК, а для  $\rho > \bar{\rho}$  - наоборот. Это значение соответствует на рис.28-30 точке Q, которая является единственной общей точкой областей А и В. Например, если измеряется величина  $\Delta h$ , (рис.28), то параметр  $\bar{\rho}$  принимает, в зависимости от уровня  $\epsilon$ , значения, приведенные в табл. I. Например, при  $\epsilon = 0,05$  зонд ЧГФ с  $L_y = 1$  м, работающий на частоте  $f_M = 30$  МГц, предпочтительнее трехэлементного зонда ДИК в средах с  $\rho \leq 300$  Ом.м.

Для сравнения методов ЧГФ и ДИК при более низких значениях

Т а б л и ц а I

Уровень $\sigma$	$\bar{p}$
0,1	4
0,05	10
0,02	25
0,01	50
0,005	100

чувствительности зондов ДИК к изменению диэлектрической проницаемости среды ( $\epsilon < 0,5$ ) нужно в качестве критерия взять точность определения этими методами значения диэлектрической проницаемости пласта. Если при сопоставлении возможностей методов потребовать, чтобы оба

метода давали одинаковую относительную погрешность определения  $\epsilon^*$  при одинаковой абсолютной погрешности измерений  $\Delta f_1 = \Delta f_2$ , то из определения величины  $\zeta$  (I.30) получается соотношение

$$\frac{\Delta f_1}{f_1 \zeta_1} = \frac{\Delta f_2}{f_2 \zeta_2} \quad \text{или} \quad f_1 \eta_1 = f_2 \zeta_2$$

Следовательно, при различных значениях разрешающей способности двух методов уровень  $\zeta_1$  зонда ДИК ниже по сравнению с уровнем  $\zeta_1 \zeta_1 / \zeta_2$  зонда ЧФ.

На рис.28-30 нанесены те же две прямые, что и на рис.20 и 21. Нетрудно видеть, что разностные характеристики  $\Delta h_1$  и  $\Delta \varphi$  предпочтительны по сравнению с характеристикой  $\Delta h_2$ . При измерении величин  $\Delta h_1$  и  $\Delta \varphi$ , как и в случае трехэлементных зондов ЧФ, требования к чувствительности аппаратуры снижаются с увеличением частоты и усиливаются при уменьшении нижней границы диапазона измеряемых значений  $\epsilon^*$  и  $\rho$ . В целом сигналы в пятиэлементных установках ЧФ ниже, чем в трехэлементных зондах. Например, при  $L_1 = 1 \text{ м}$ ,  $f_M = 50 \text{ МГц}$  при исследовании пластов с диапазоном параметров  $5 \leq \epsilon^* \leq 80$ ,  $10 \leq \rho < \infty$  в случае пятиэлементного зонда требуется обеспечить возможность регистрации, по крайней мере, 0,01 единиц относительной амплитуды, а фазомер должен обладать точностью не менее чем в 0,02 радиана.

Определение частоты и длины зонда при известном минимальном уровне сигнала по графикам на рис.31-33 производится так же, как и для трехэлементных зондов. Например, если зонд с  $L_1 = 1 \text{ м}$  способен регистрировать сигнал величины 0,005 и более относительной амплитуды, то для работы в пластах с  $5 \leq \epsilon^* \leq 80$ ,  $\rho \geq 10 \text{ Ом.м}$  должно быть  $f_M \geq 25 \text{ МГц}$  (рис.31), а для фазометра с пороговой чувствительностью 0,05 радиана  $f_M \geq 70 \text{ МГц}$  (рис.33).

Зонд ЧГФ обладает высокой чувствительностью к диэлектрической проницаемости среды, и если его применять в комплексе с обычным трехэлементным зондом ДИК, то можно проводить уверенную интерпретацию с целью одновременного определения  $\rho$  и  $\varepsilon^*$  пласта. На рис. 34–36 приводятся палетки, позволяющие определять  $\rho$  и  $\varepsilon^*$ , если известны частота и длина установки и значения измеряемых характеристик для трехэлементного зонда ДИК и пятиэлементного зонда ЧГФ. Точность интерпретации по таким палеткам зависит от угла, под которым пересекаются кривые на графиках. С этой точки зрения, наиболее благоприятны фазовые измерения, из амплитудных измерений пара  $\Delta h_1, dh_1$  может быть более точно проинтерпретирована по сравнению с  $\Delta h_2$  и  $dh_2$ .

#### § 4. Радиальные характеристики зондов с частотно-геометрической фокусировкой

Для анализа влияния скважины и зоны проникновения были проведены расчеты характеристик зондов ЧГФ в двухслойной и трехслойной цилиндрически-слоистых моделях. Во всех случаях радиус скважины полагался равным 0,1 м, удельное сопротивление скважины  $\rho_c = 1 \text{ Ом.м}$ , относительная диэлектрическая проницаемость в скважине  $\varepsilon_c^* = 80$ .

Рассмотрим на основе полученных результатов чувствительность измеряемых величин к диэлектрической проницаемости пласта, а также оценим соотношение между результатами измерений в скважине и данными аналогичных измерений в однородной среде. Сначала исследуем трехэлементные зонды ЧГФ в модели "скважина-пласт" бесконечной мощности" и сравним их с трехэлементными зондами ДИК.

Расчеты проводились на частоте  $f_1 = 30 \text{ МГц}$ . Рассматривалась 4 зонда:

Зонды ДИК ( $f = 30 \text{ МГц}$ )

Зонды ЧГФ ( $f_1 = 30 \text{ МГц}$ ,  
 $f_2 = 15 \text{ МГц}$ )

- |                            |                         |                         |                               |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| 1) $L_1 = 0,8 \text{ м}$ , | $L_2 = 1 \text{ м}$ ;   | $L_1 = 0,8 \text{ м}$ , | $L_2 = 0,8\sqrt{2} \text{ м}$ |
| 2) $L_1 = 1,2 \text{ м}$ , | $L_2 = 1,4 \text{ м}$ ; | $L_1 = 1,2 \text{ м}$ , | $L_2 = 1,2\sqrt{2} \text{ м}$ |
| 3) $L_1 = 1,6 \text{ м}$ , | $L_2 = 1,8 \text{ м}$ ; | $L_1 = 1,6 \text{ м}$ , | $L_2 = 1,6\sqrt{2} \text{ м}$ |
| 4) $L_1 = 2,0 \text{ м}$ , | $L_2 = 2,2 \text{ м}$ ; | $L_1 = 2,0 \text{ м}$ , | $L_2 = 2,0\sqrt{2} \text{ м}$ |

Как уже отмечалось, трехэлементные зонды ДИК обладают фокусирую-

шими свойствами, что позволяет ослабить влияние скважины. Фазовые измерения трехэлементным зондом ЧФФ этим свойством уже не обладают, так как из-за разных частот, на которых работают зонды ЧФФ, аддитивная фазовая помеха, связанная с произведением волнового числа скважины на ее радиус, не может быть исключена. На рис.37-38 приводятся графики фазовых измерений зондами ДИК и ЧФФ при  $L_1 = 0,8$  м. По оси абсцисс отложены значения диэлектрической проницаемости пласта, шифр кривых - удельное сопротивление пласта. Как следует из анализа рисунков при  $\rho_n \geq 16$  зонды ДИК обладают большей чувствительностью к изменению диэлектрической проницаемости среды по сравнению с зондами ЧФФ, данные которых к тому же слабо дифференцированы по  $\rho_n$ . Аналогичные результаты имеют место и для зондов с другими значениями  $L_1$ , что свидетельствует о нецелесообразности фазовых измерений трехэлементными зондами ЧФФ.

Более эффективным параметром является разностная амплитуда трехэлементных зондов ЧФФ, что иллюстрируется рис.39-42. Из графиков видно, что трехэлементный зонд ЧФФ более чувствителен к изменению параметров пласта по сравнению с трехэлементным зондом ДИК. Особенно это заметно для низких значений  $\rho_n$  и  $\epsilon_n^*$ . Кривые ЧФФ лучше дифференцированы по значениям удельного сопротивления пласта. Чувствительность к диэлектрической проницаемости пласта с увеличением длины трехэлементного зонда ЧФФ почти не изменяется при больших удельных сопротивлениях пласта и возрастает в пластах с пониженным удельным сопротивлением (рис.40,42). Величина измеряемого сигнала с увеличением длины зонда возрастает в высокоомных пластах ( $\rho_n > 32$  Ом.м) и уменьшается в низкоомных ( $\rho_n < 32$  Ом.м).

В таблице II для трехэлементных зондов различной длины приведены отношения величины  $\delta^h$  в модели "скважина-пласт" к значениям  $\delta^h$  тех же зондов в однородной среде с параметрами пласта. Частота  $f_1 = 30$  МГц. Из таблицы следует, что показания практически всех зондов в пластах с  $\rho_n \epsilon_n^* > 40$  не более чем на 20% отличаются от показаний в однородной среде.

Сопоставим теперь возможности трехэлементных зондов ДИК и пятиэлементных зондов ЧФФ. Расчеты, проведенные в двухслойной среде на частотах  $f_1 = 1, 10, 30$  МГц для трехэлементных зондов ДИК 1) - 4) и их пятиэлементных аналогов ЧФФ, показали следующее:

Т а б л и ц а П

	$\rho$	$\epsilon^*$					
		2,5	5	10	20	40	80
0,8	2	7,125	3,962	2,375	1,572	1,152	0,9052
	4	3,026	1,946	1,402	1,120	0,9578	0,8326
	8	1,467	1,186	1,041	0,9572	0,8913	0,8019
	16	0,9922	0,9407	0,9297	0,9119	0,8721	0,7762
	32	0,8076	0,8765	0,9049	0,9033	0,8608	0,7412
	64	0,7856	0,8706	0,9049	0,9007	0,8460	0,7034
	128	0,7992	0,8790	0,9077	0,8960	0,8308	0,6729
	256	0,8179	0,8864	0,9079	0,8907	0,8192	0,6529
	512	0,8312	0,8897	0,9066	0,8866	0,8119	0,6413
1,2	2	5,541	3,184	2,029	1,444	1,131	0,9344
	4	2,553	1,737	1,324	1,107	0,9788	0,8711
	8	1,396	1,168	1,049	0,9792	0,9214	0,8403
	16	1,009	0,9805	0,9613	0,9401	0,9014	0,8143
	32	0,8971	0,9289	0,9391	0,9297	0,8878	0,7790
	64	0,8768	0,9213	0,9361	0,9242	0,8707	0,7381
	128	0,8836	0,9249	0,9355	0,9169	0,8523	0,7023
	256	0,8947	0,9281	0,9331	0,9092	0,8375	0,6772
	512	0,9021	0,9285	0,9301	0,9034	0,8278	0,6621
1,6	2	4,425	1,666	1,459	1,257	1,114	0,9494
	4	2,299	1,624	1,278	1,093	0,9858	0,8892
	8	1,327	1,142	1,042	0,9864	0,9346	0,8580
	16	1,022	0,9926	0,9729	0,9518	0,9147	0,8336
	32	0,9317	0,9496	0,9530	0,9410	0,9005	0,7994
	64	0,9137	0,9418	0,9487	0,9341	0,8823	0,7573
	128	0,9175	0,9431	0,9464	0,9252	0,8619	0,7178
	256	0,9247	0,9441	0,9424	0,9159	0,8445	0,6885
	512	0,9291	0,9429	0,9381	0,9084	0,8326	0,6702

I. Чувствительность к диэлектрической проницаемости пласта у пятиэлементных зондов ЧГФ существенно выше, чем у трехэлементных зондов ДИК. Это имеет место как для амплитудных, так и для фазовых характеристик. В качестве примера на рис.43-46 приводятся результаты расчетов для зондов с  $L_1 = 0,8$  м.

2. Фокусирующие свойства пятиэлементного зонда ЧГФ обеспечиваются хорошими фокусирующими свойствами трехэлементных зондов ДИК. Рассмотрим отношения  $\rho_{kh}$  и  $\rho_{ky}$  величин  $\Delta h_1$  и  $\Delta y$  в модели "скважина-пласт" к значениям  $\Delta h_1$  и  $\Delta y$  в пласте без скважины (табл. III). В таблице приведены значения  $\rho_{kh}$  и  $\rho_{ky}$  для зондов с  $L_1 = 0,8$  м, 1,2 м, 1,6 м, на частоте  $f_1 = 30$  МГц. Кроме того, для зонда с  $L_1 = 1,6$  м приведены величины  $\rho_{kh}$  и  $\rho_{ky}$  на частоте  $f_1 = 10$  МГц. Анализ таблицы позволяет отметить следующие закономерности:

- увеличение частоты улучшает фокусирующие свойства зондов ЧГФ;

- влияние скважины ослабевает при увеличении отношения  $\rho_n/\rho_c$  и уменьшении отношения  $\epsilon_n^*/\epsilon_c^*$ ;

- на частоте 30 МГц в пластах с  $\epsilon^* \geq 10$  для любых значений удельного сопротивления пласта, начиная с 1 Ом.м и выше, значения  $\Delta h_1$  в скважине отличаются от значений в однородной среде не более чем на 20%;

- удлинение зонда несколько улучшает его фокусирующие свойства.

3. В отличие от трехэлементных зондов ДИК, у пятиэлементных зондов ЧГФ с ростом удельного сопротивления пласта  $\rho_n$  уровень сигналов растет. Это обстоятельство является предпосылкой для комплексирования измерений трехэлементным зондом ДИК и пятиэлементным зондом ЧГФ с целью одновременного определения  $\rho_n$  и  $\epsilon_n^*$ . Действительно, пусть  $dh_1 = a$ ,  $\Delta h_1 = b$ . Тогда множество пар  $(\rho_n, \epsilon_n^*)$ , для которых  $dh_1 = a$ , таково, что с ростом  $\epsilon_n^*$  растет и  $\rho_n$ , а множество пар  $(\rho_n, \epsilon_n^*)$ , для которых  $\Delta h_1 = b$ , обладает противоположным свойством - с ростом  $\epsilon_n^*$  величина  $\rho_n$  падает.

Для изучения глубинности метода частотно-геометрической фокусировки проводились расчеты в трехслойной модели "скважина-зона проникновения-пласт бесконечной мощности". Радиус зоны проникновения полагался равным 0,2; 0,3; 0,4 м. Диэлектрическая проницаемость зоны проникновения была фиксированной:  $\epsilon_{3n} = 20$ . Удельное сопротивление зоны проникновения ( $\rho_{3n}$ ) предполагалось равным 8 Ом.м или 64 Ом.м. Анализ полученных результатов приводит к следующим выводам:

I. Для всех исследуемых пятиэлементных зондов ЧГФ наблюда-

Т а б л и ц а Ш

23		$\rho$	$\varepsilon^*$												
			2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	60	80			
$L_1 = 10 \text{ м}$	$f_1 = 10 \text{ МГц}$	$P_{kh}$	2	-0,0556	0,4603	0,6365	0,7343	0,8181	0,8529	0,9061	0,9360	0,9533	0,9683		
			4	-0,5031	0,2543	0,5036	0,6315	0,7578	0,8206	0,8838	0,9152	0,9461	0,9611		
			8	-0,3937	0,3191	0,5555	0,6740	0,7909	0,8490	0,9059	0,9336	0,9599	0,9722		
			16	-0,1520	0,4547	0,6542	0,7526	0,8486	0,8946	0,9381	0,9580	0,9758	0,9835		
			32	0,1131	0,6045	0,7612	0,8360	0,9056	0,9370	0,9648	0,9765	0,9862	0,9901		
			64	0,3617	0,7412	0,8536	0,9039	0,9476	0,9659	0,9808	0,9865	0,9910	0,9927		
			128	0,5777	0,8481	0,9192	0,9485	0,9721	0,9811	0,9879	0,9905	0,9925	0,9934		
			256	0,7492	0,9191	0,9577	0,9723	0,9831	0,9872	0,9903	0,9917	0,9929	0,9935		
			512	0,8675	0,9578	0,9755	0,9819	0,9870	0,9891	0,9909	0,9919	0,9929	0,9935		
			$L_1 = 1,6 \text{ м}$	$P_{ky}$	2	0,1593	0,5708	0,7104	0,7884	0,8589	0,8833	0,9252	0,9486	0,9625	0,9743
					4	0,0614	0,5520	0,6864	0,7661	0,8445	0,8837	0,9233	0,9430	0,9625	0,9722
					8	0,2757	0,6398	0,7609	0,8217	0,8822	0,9125	0,9426	0,9577	0,9725	0,9798
					16	-0,4721	0,7390	0,8277	0,8720	0,9164	0,9384	0,9602	0,9710	0,9814	0,9863
					32	0,6139	0,8112	0,8767	0,9094	0,9417	0,9577	0,9732	0,9806	0,9874	0,9904
64	0,7087	0,8605			0,9106	0,9354	0,9594	0,9709	0,9816	0,9864	0,9906	0,9924			
128	0,7708	0,8943			0,9342	0,9553	0,9711	0,9792	0,9863	0,9893	0,9920	0,9931			
256	0,8128	0,9183			0,9504	0,9650	0,9780	0,9836	0,9885	0,9906	0,9925	0,9934			
512	0,8438	0,9352			0,9607	0,9718	0,9814	0,9825	0,9894	0,9911	0,9928	0,9936			



Таблица III (продолжение I)

		$\varepsilon^*$	2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	60	80
		$e$										
$L_1 = 1,6M, F_1 = 30M\Gamma_4$	$P_{KH}$	2	2,355	1,531	1,778	1,199	3,000	1,015	1,647	1,002	0,9957	0,9927
		4	0,3590	0,6803	0,7328	0,8459	0,8691	0,9254	0,9545	0,9675	0,9803	0,9864
		8	0,3722	0,6990	0,8137	0,8596	0,9142	0,9371	0,9615	0,9729	0,9834	0,9881
		16	0,4662	0,1592	0,8521	0,8973	0,9389	0,9578	0,9744	0,9815	0,9874	0,9901
		32	0,6190	0,8441	0,9099	0,9290	0,9642	0,9746	0,9829	0,9862	0,9891	0,9906
		64	0,7686	0,9142	0,9513	0,9663	0,9781	0,9826	0,9861	0,9876	0,9892	0,9904
		128	0,8775	0,9550	0,9720	0,9784	0,9831	0,9856	0,9867	0,9877	0,9890	0,9902
		256	0,9384	0,9727	0,9796	0,9822	0,9843	0,9854	0,9866	0,9875	0,9888	0,9900
		512	0,9647	0,9785	0,9816	0,9830	0,9844	0,9853	0,9865	0,9873	0,9886	0,9888
		$P_{K\psi}$	2	3,765	2,088	2,291	1,384	3,928	1,076	1,076	1,011	0,9919
4	0,4442		0,7189	0,7675	0,8616	0,8803	0,9307	0,9564	0,9680	0,9792	0,9846	
8	0,5681		0,7842	0,8643	0,8598	0,9335	0,9494	0,9668	0,9753	0,9833	0,9869	
16	0,6931		0,8506	0,9019	0,9282	0,9533	0,9556	0,9770	0,9821	0,9867	0,9887	
32	0,7936		0,9014	0,9363	0,9533	0,9693	0,9765	0,9830	0,9857	0,9881	0,9892	
64	0,8629		0,9361	0,9587	0,9690	0,9782	0,9821	0,9855	0,9870	0,9884	0,9893	
128	0,9088		0,9574	0,9712	0,9770	0,9820	0,9842	0,9862	0,9873	0,9884	0,9892	
256	0,9377		0,9688	0,9768	0,9803	0,9834	0,9849	0,9864	0,9873	0,9884	0,9892	
512	0,9537		0,9737	0,9790	0,9815	0,9838	0,9851	0,9865	0,9873	0,9883	0,9891	

Таблица III (продолжение 2)

		$\epsilon^*$	2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	60	80
		$\epsilon$										
$L = 1,2 \text{ м};$	$\beta_{kh}$	2	0,6199	0,8062	0,8626	0,9077	0,9761	0,9634	0,9737	0,9818	0,9893	0,9955
		4	0,5886	0,6269	0,7461	0,8189	0,8788	0,9144	0,9461	0,9617	0,9774	0,9851
		8	0,1544	0,5940	0,7406	0,8116	0,8827	0,9169	0,9499	0,9654	0,9797	0,9863
		16	0,2366	0,6553	0,7898	0,8537	0,9139	0,9412	0,9654	0,9757	0,9846	0,9886
		32	0,4205	0,7637	0,8648	0,9037	0,9484	0,9643	0,9829	0,9822	0,9868	0,9893
		64	0,6289	0,8651	0,9256	0,9499	0,9689	0,9761	0,9818	0,9842	0,9902	0,9891
		128	0,7966	0,9295	0,9583	0,9689	0,9768	0,9799	0,9828	0,9844	0,9868	0,9888
		256	0,8955	0,9663	0,9707	0,9743	0,9789	0,9808	0,9827	0,9847	0,9866	0,9886
		512	0,9664	0,9707	0,9743	0,9767	0,9791	0,9811	0,9825	0,9846	0,9865	0,9885
	$\beta_{ky}$	2	0,4869	0,7356	0,8115	0,8718	0,9736	0,9469	0,9601	0,9703	0,9800	0,9876
		4	0,6689	0,6684	0,7793	0,8360	0,8880	0,9193	0,9470	0,0906	0,9742	0,9807
		8	0,4274	0,7170	0,8144	0,8615	0,9097	0,9331	0,9563	0,9675	0,9781	0,9830
		16	0,5618	0,7864	0,8605	0,8976	0,9338	0,9511	0,9676	0,9751	0,9818	0,9848
		32	0,6826	0,8490	0,9031	0,9293	0,9540	0,9653	0,9830	0,9796	0,9837	0,9852
		64	0,7745	0,8961	0,9339	0,9512	0,9666	0,9732	0,9788	0,9813	0,9796	0,9852
128		0,8402	0,9279	0,9526	0,9633	0,9725	0,9764	0,9800	0,9818	0,9837	0,9850	
256		0,8861	0,9492	0,9619	0,9678	0,9747	0,9775	0,9803	0,9818	0,9836	0,9848	
512		0,9150	0,9586	0,9658	0,9706	0,9755	0,9776	0,9804	0,9818	0,9835	0,9847	

Таблица III (продолжение 3)

		$\varepsilon^*$	2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	60	80
		$\rho$										
$f_1 = 30 \text{ МГц}$	$\rho_{\text{кн}}$	2	1,208	1,106	1,073	1,056	1,037	1,031	1,023	1,020	1,016	1,015
		4	0,5886	0,7964	0,8667	0,9008	0,9362	0,9537	0,9720	0,9815	0,9917	0,9973
		8	0,1531	0,5917	0,7375	0,8098	0,8817	0,9170	0,9516	0,9883	0,9844	0,9923
		16	0,0295	0,5604	0,7317	0,8142	0,8924	0,9284	0,9608	0,9683	0,9874	0,9933
		32	0,1419	0,6514	0,8030	0,8710	0,9300	0,9545	0,9743	0,9749	0,9897	0,9940
		64	0,3822	0,7817	0,8848	0,9264	0,9588	0,9711	0,9808	0,9823	0,9902	0,9941
		128	0,6341	0,8835	0,9370	0,9565	0,9712	0,9770	0,9824	0,9651	0,9901	0,9939
		256	0,8152	0,9354	0,9584	0,9672	0,9747	0,9783	0,9825	0,9853	0,9899	0,9938
		512	0,9049	0,9534	0,9647	0,9700	0,9753	0,9784	0,9823	0,9852	0,9897	0,9936
	$\rho_{\text{кф}}$	2	0,9638	0,9810	0,9876	0,9894	0,9895	0,9942	0,9962	0,9971	0,9984	0,9994
		4	0,6689	0,8323	0,8877	0,9142	0,9420	0,8555	0,9695	0,9776	0,9839	0,9877
		8	0,4512	0,7273	0,8194	0,8652	0,9111	0,9339	0,9563	0,9676	0,9783	0,9834
		16	0,4390	0,7263	0,8217	0,8690	0,9156	0,9383	0,9599	0,9699	0,9788	0,9828
		32	0,5115	0,7687	0,8527	0,8936	0,9326	0,9506	0,9753	0,9735	0,9796	0,9825
		64	0,5991	0,8185	0,8871	0,9190	0,9476	0,9600	0,9706	0,9752	0,9796	0,9820
		128	0,6785	0,8609	0,9134	0,9364	0,9526	0,9647	0,9722	0,9757	0,9794	0,9816
		256	0,7435	0,8896	0,9286	0,9454	0,9601	0,9666	0,9727	0,9757	0,9792	0,9814
		512	0,7895	0,9053	0,9360	0,9495	0,9617	0,9673	0,9728	0,9757	0,9790	0,9812

ется монотонный рост сигнала при увеличении диэлектрической проницаемости пласта. При повышающемся проникновении кривые  $\Delta h_1$  и  $\Delta \varphi$  проходят через ноль. Характерное для всех моделей среды и различных зондов поведение графиков измеряемых величин иллюстрируют рис.47-54. На них изображены результаты расчетов для зонда с  $L_1 = 1,6$  м при радиусе зоны проникновения  $a_{3n} = 0,3$  м. Рис.47-50 соответствуют значению  $\rho_{3n} = 8$  Ом.м, рис.51-54 - значению  $\rho_{3n} = 64$  Ом.м. По оси абсцисс отложены значения относительной диэлектрической проницаемости пласта  $\epsilon_n^*$ . Шифр кривых -  $\rho_n$ . На графиках можно наблюдать, что с ростом удельного сопротивления пласта смена знака у измеряемых зондами ЧФ величин происходит при все меньших значениях диэлектрической проницаемости пласта.

2. Во всех исследованных моделях пятиэлементные зонды ЧФ обладают более высокой чувствительностью к изменению диэлектрической проницаемости пласта по сравнению с трехэлементными зондами ДИК. Это свидетельствует одновременно и о большей глубинности метода ЧФ.

## § 5. Вертикальные характеристики зондов ЧФ

Как было показано в предыдущем параграфе, пятиэлементные зонды ЧФ обладают повышенной глубиной исследования в радиальном направлении. Другой важной характеристикой метода является локальность исследования в вертикальном направлении. Понятие локальности связано с влиянием горизонтальных границ на результаты измерений: из двух методов более локальным принято считать тот, у которого влияние горизонтальных границ начинает сказываться при меньшем их удалении от элементов зонда.

В качестве основной модели для исследования вертикальных характеристик традиционно используется пласт конечной мощности  $H$ , расположенный в однородной среде. Были проведены расчеты кривых профилирования пятиэлементными зондами ЧФ в различных моделях. В качестве примера на рис.55-60 приведены кривые профилирования для трех измеряемых характеристик пятиэлементного зонда ЧФ в моделях, изображенных на рис.61. Мощность пласта полагалась равной 4 м. Пятиэлементный зонд имеет параметры  $L_1 =$

0,8 м,  $L_2 = 1,0$  м,  $\alpha = \sqrt{2}$ ,  $f_1 = 30$  МГц. У всех измеряемых характеристик наблюдается два экстремума, расстояние между которыми равно мощности пласта. При этом экстремумы на кривых профилирования соответствуют таким положениям зонда, при которых центр измерительной базы расположен против границы пласта. Отсюда следует, что точкой записи зонда целесообразно считать центр базы, расположенный на расстоянии  $(L_3 + L_4)/2$  от источника поля.

Большая мощность пласта в рассматриваемом примере обеспечивает уверенный выход измеряемых характеристик на значения, соответствующие однородной среде с параметрами пласта. Взаимодействие границ практически отсутствует: в окрестности каждой границы кривые профилирования имеют такую же форму, как в среде с двумя полупространствами (ср. кривые профилирования в окрестностях экстремальных значений одного знака на рис.55 и 58, 56 и 59, 57 и 60). Четко фиксируются границы на кривых профилирования и в случае, когда мощность пласта сравнима с длиной зонда. В качестве примера на рис.62 и 63 приводятся кривые профилирования для  $H = 1,4$  м. В целом анализ расчетов показывает, что если мощность пласта превосходит длину измерительной базы зонда, то на кривых профилирования имеются экстремумы, отмечающие положение границ.

В случае, когда центр измерительной базы зонда располагается в центре пласта, измеряемые параметры, как это следует из рис.62,63, имеют значения, близкие к значениям в однородной среде. Это свидетельствует о том, что при интерпретации данных, полученных в процессе вертикального профилирования зондами ЧФФ следует использовать значения измеряемых характеристик, соответствующие центральному (относительно пласта) положению измерительной базы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ДАЕВ Д.С. Высокочастотные электромагнитные методы исследования скважин. М., "Недра", 1974, 190 с.

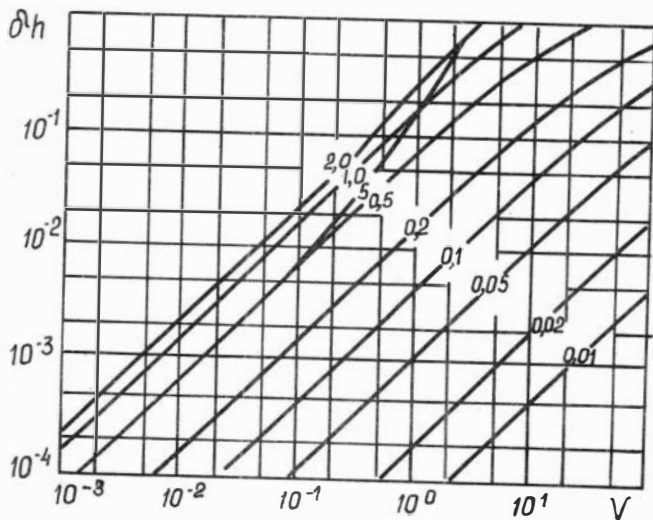


Рис. 1.

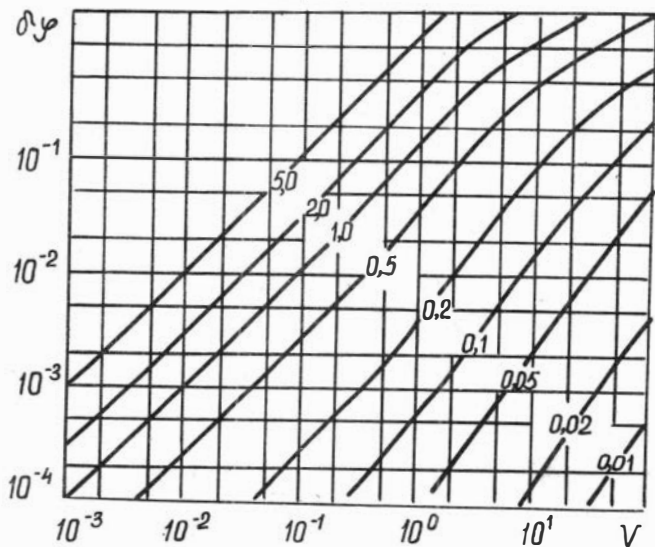


Рис. 2

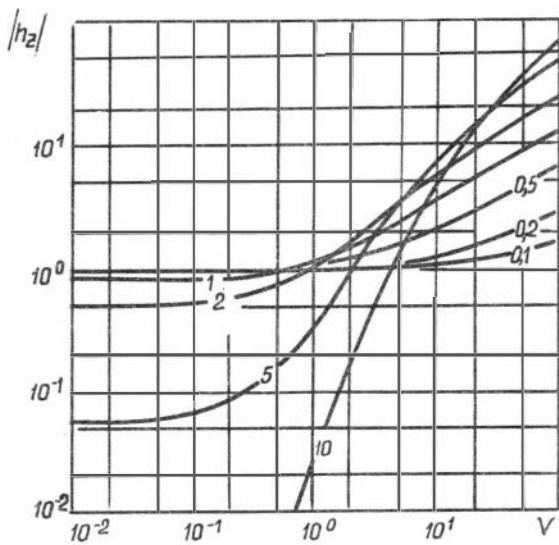


Рис.3

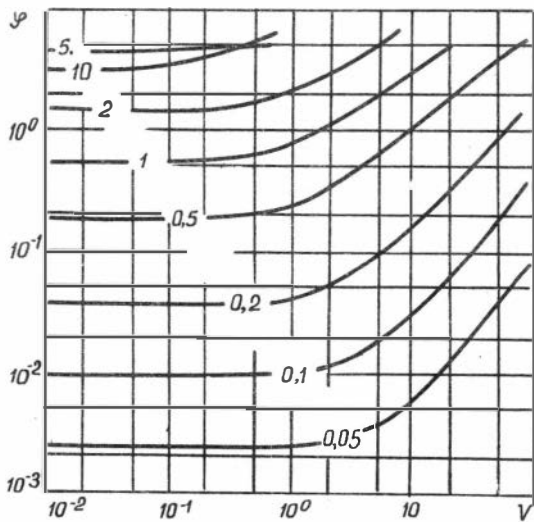


Рис.4

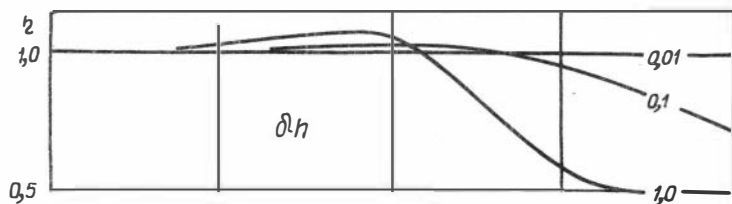


Рис.5

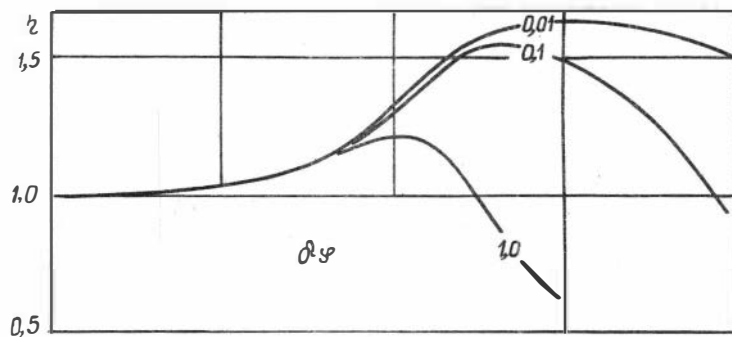


Рис.6

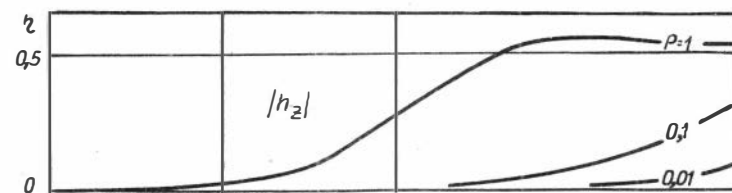


Рис.7

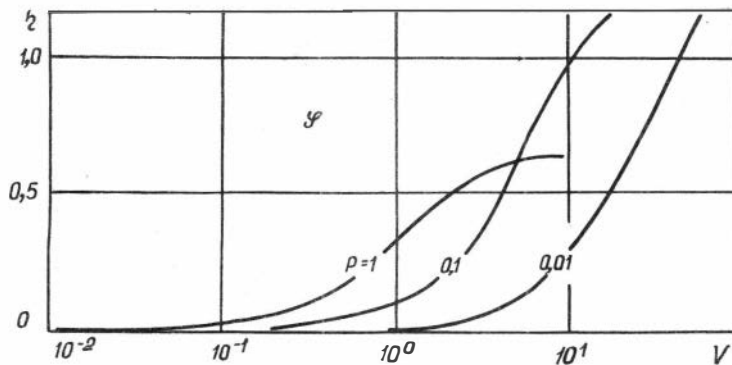


Рис.8



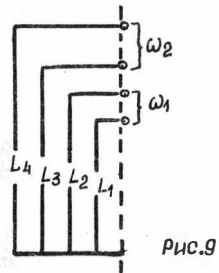


Рис.9

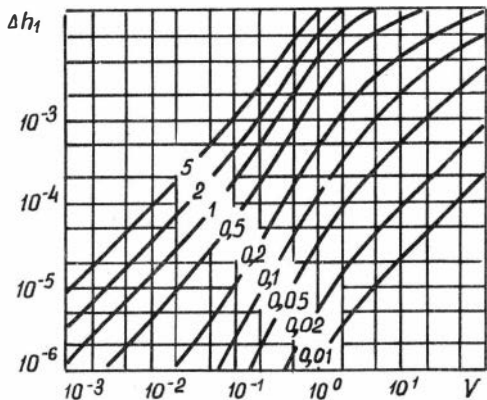


Рис.10

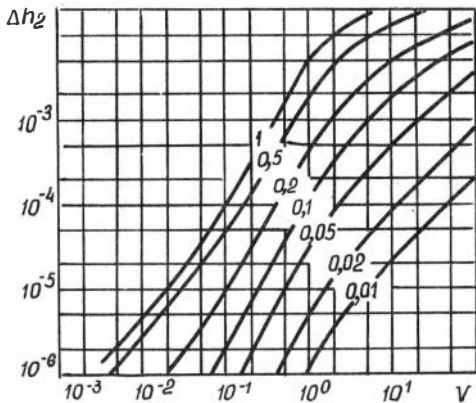


Рис.11

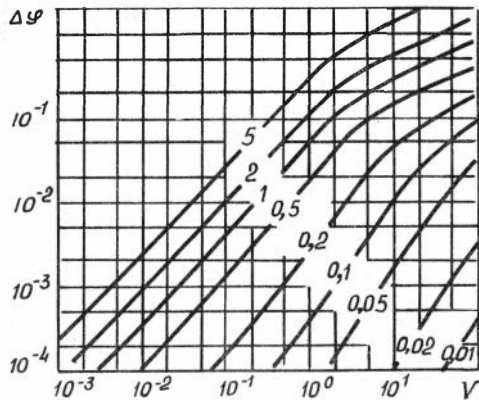


Рис.12

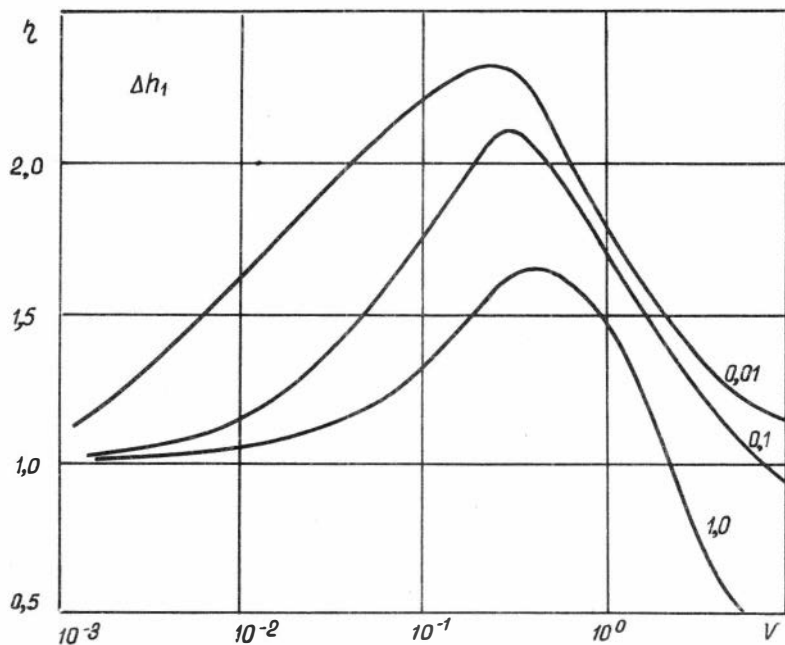


Рис.13

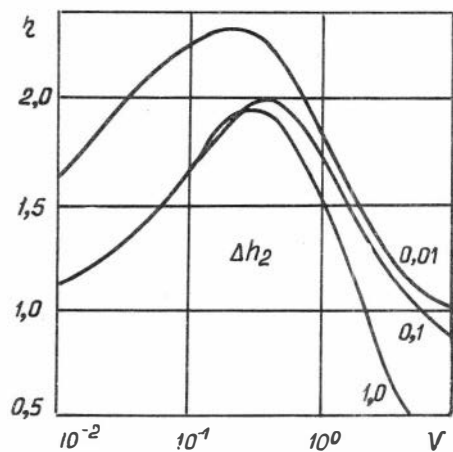


Рис.14

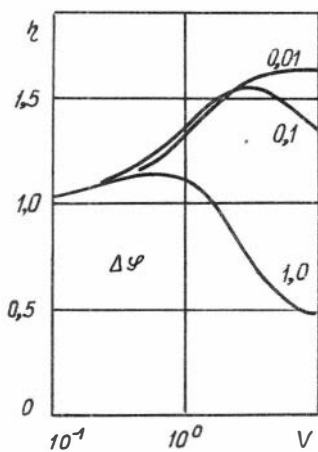


Рис.15

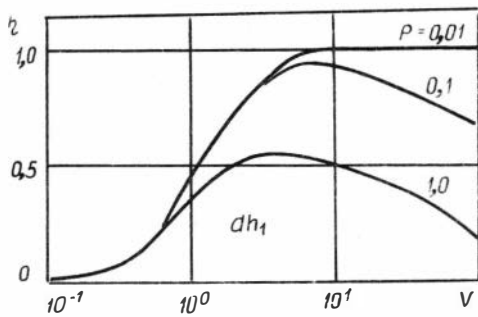


Рис.16

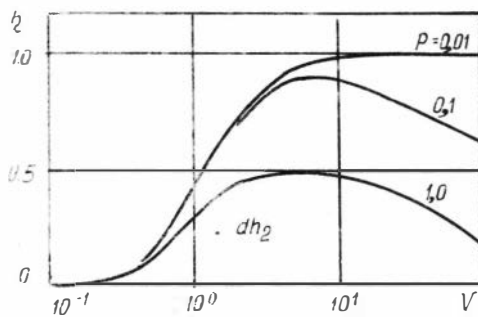


Рис.17

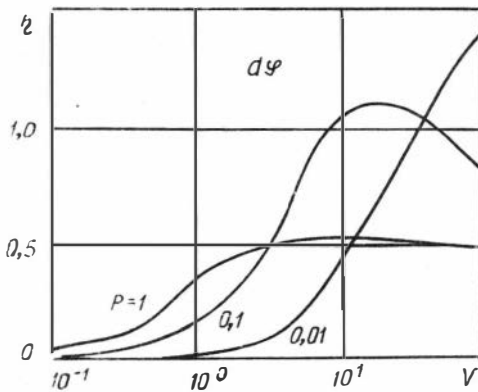


Рис.18

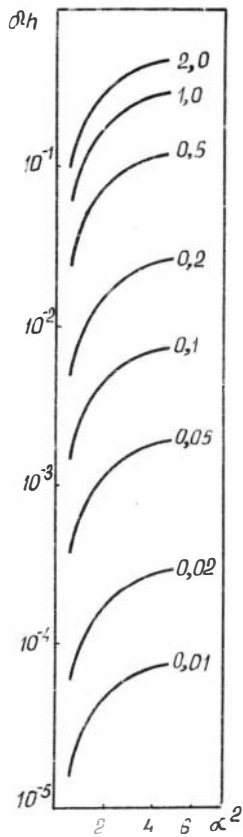


Рис.19

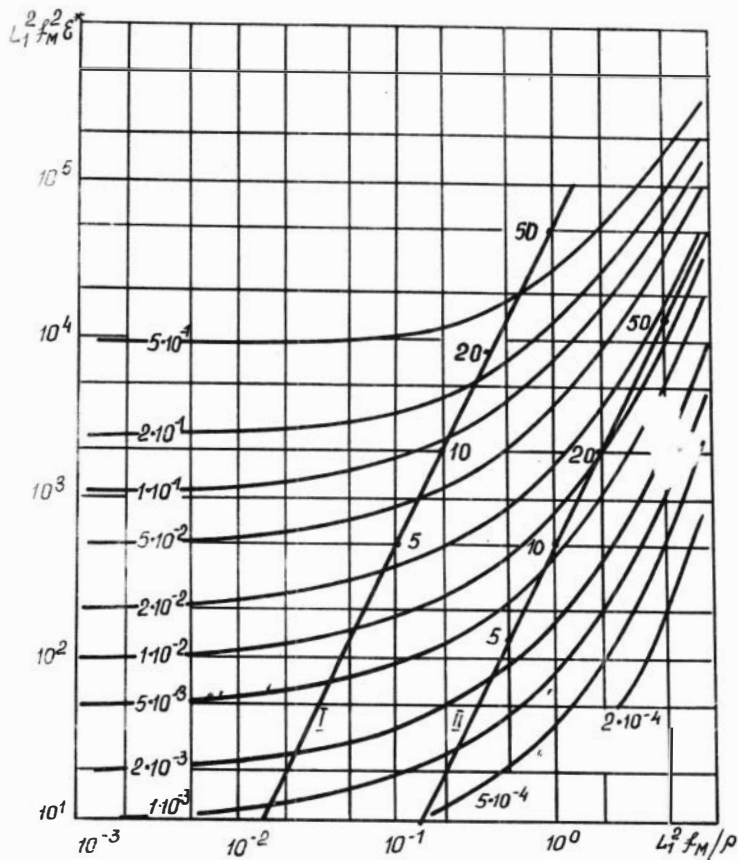


Рис. 20

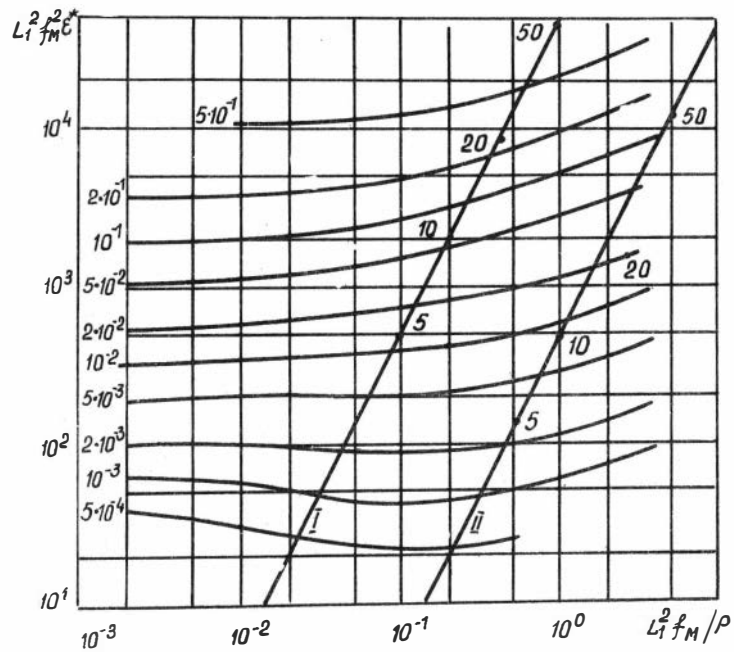


Рис. 21

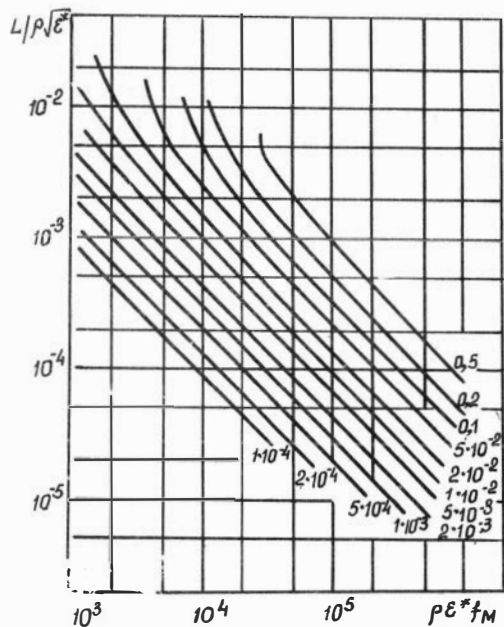


Рис. 22

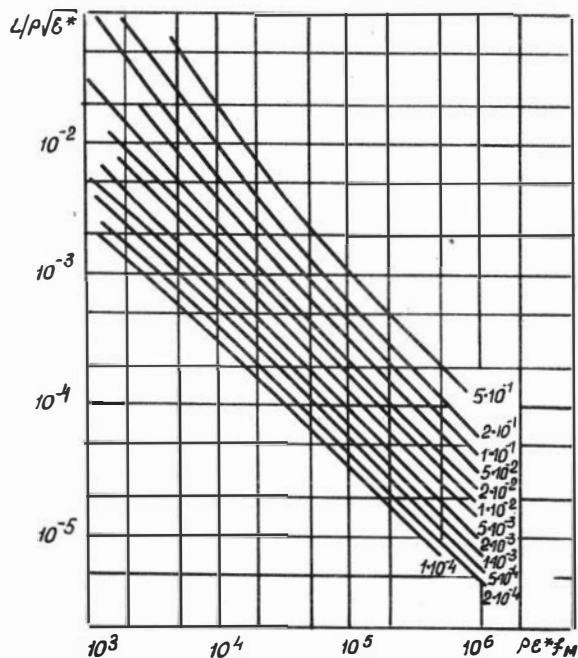


Рис. 23

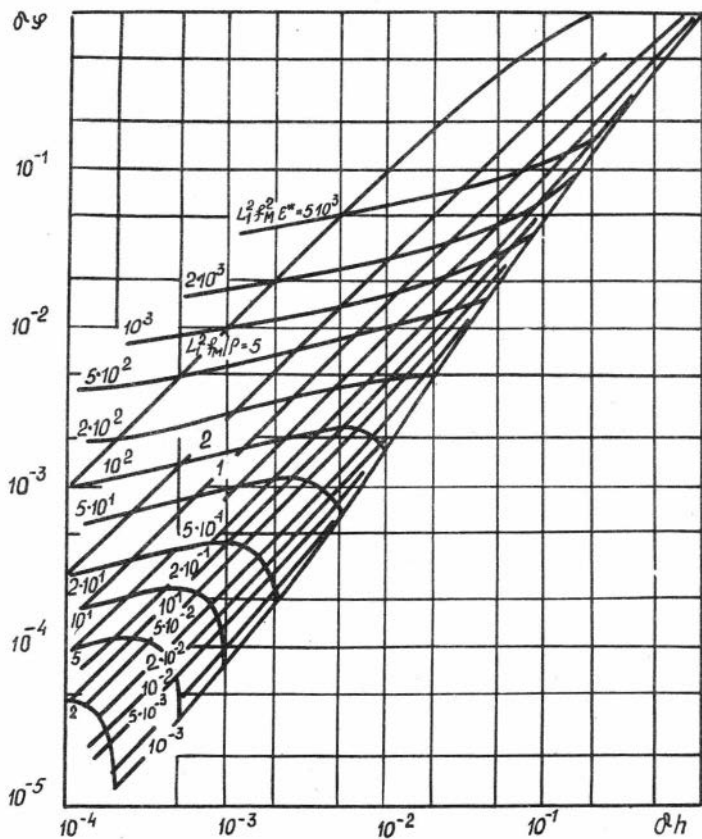
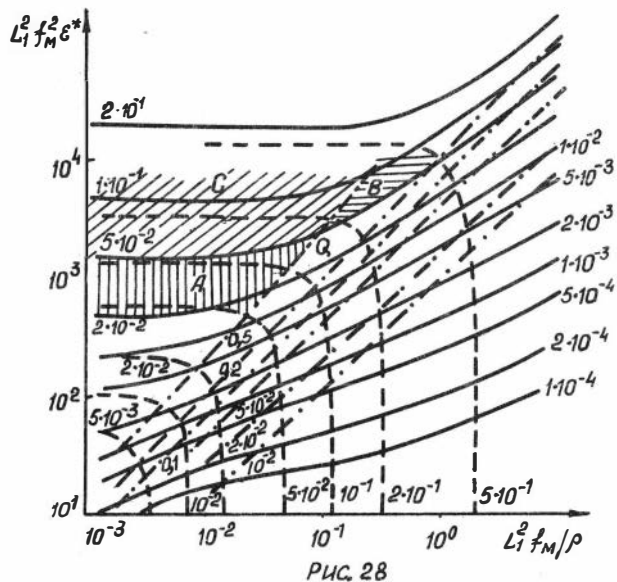
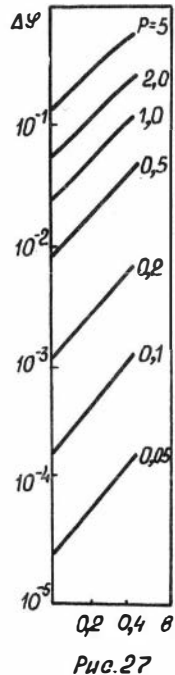
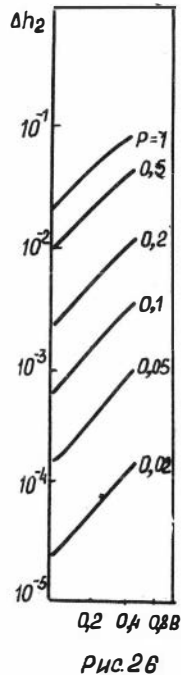
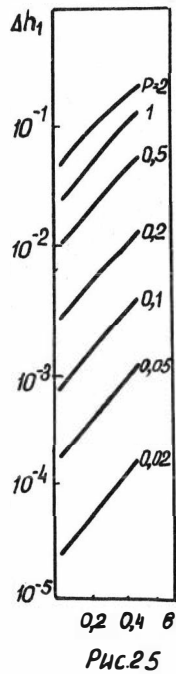


Рис. 24





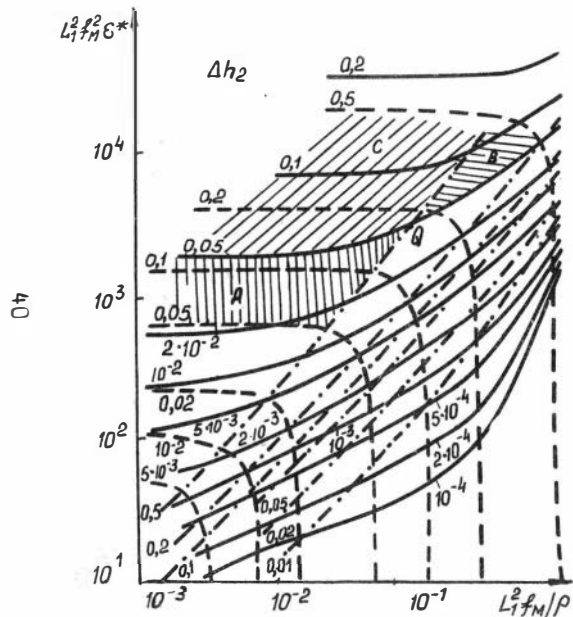


Рис. 29

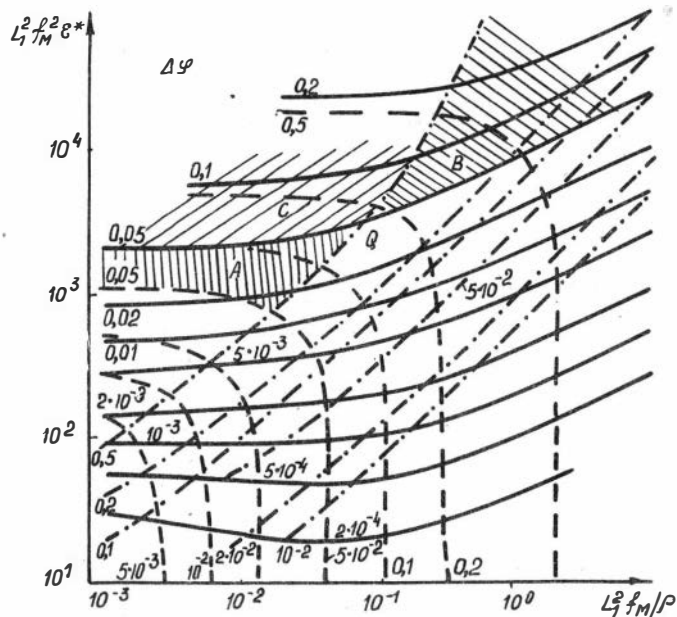


Рис. 30

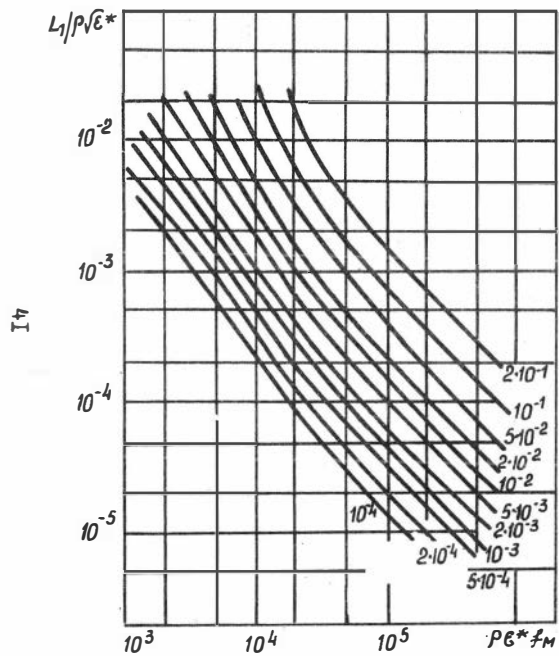


Рис. 31

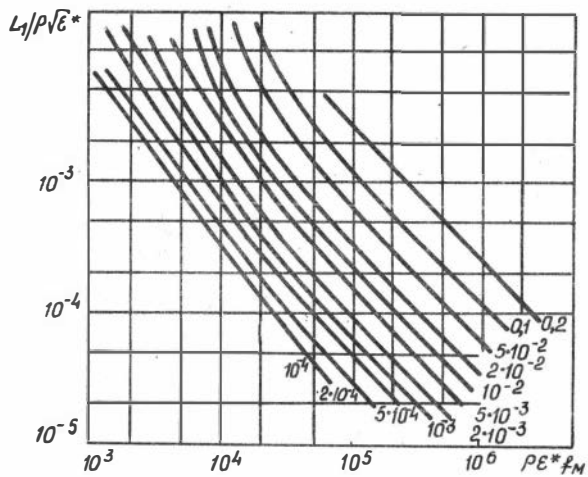


Рис. 32

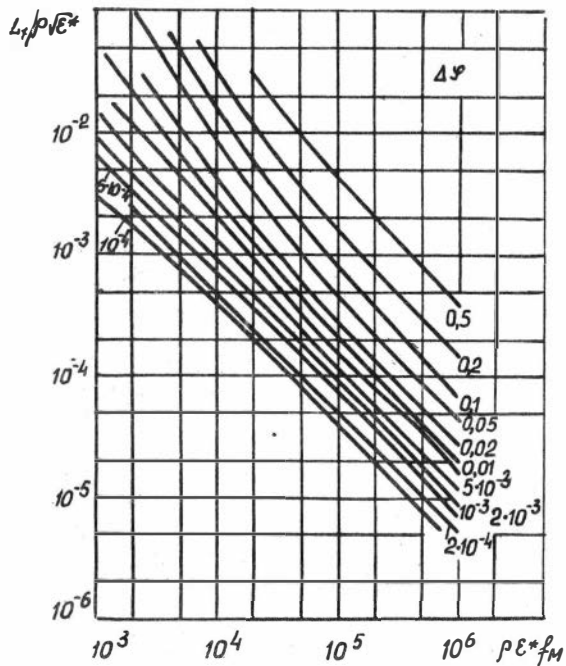


Рис. 33

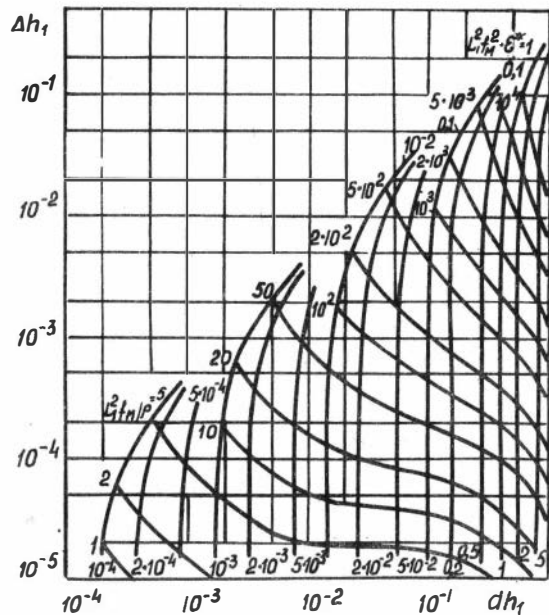


Рис. 34

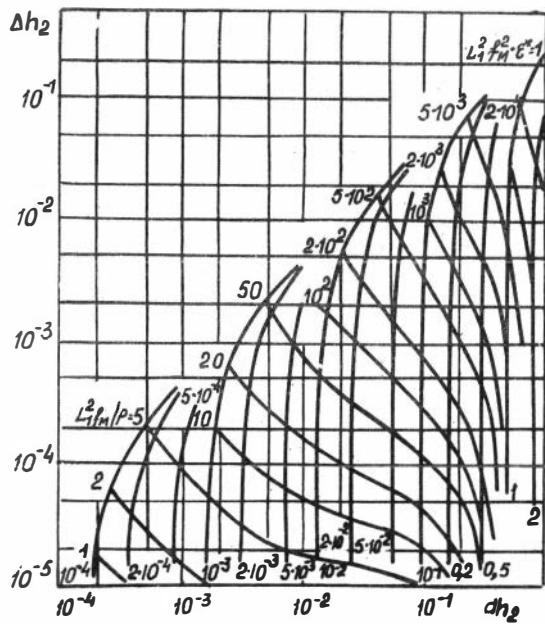


Рис. 35

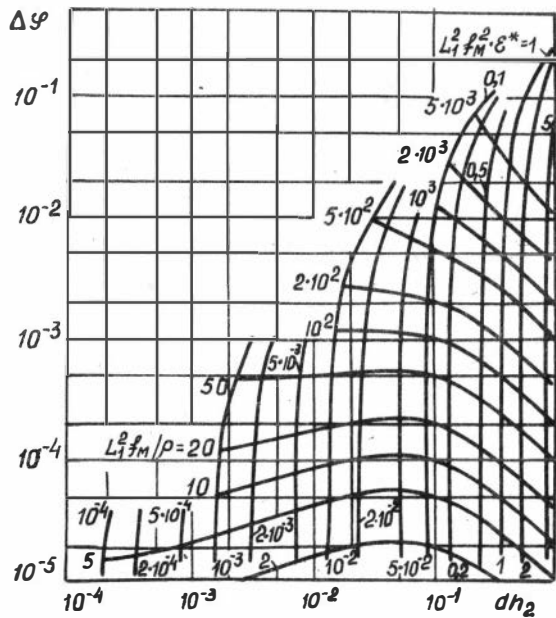


Рис. 36

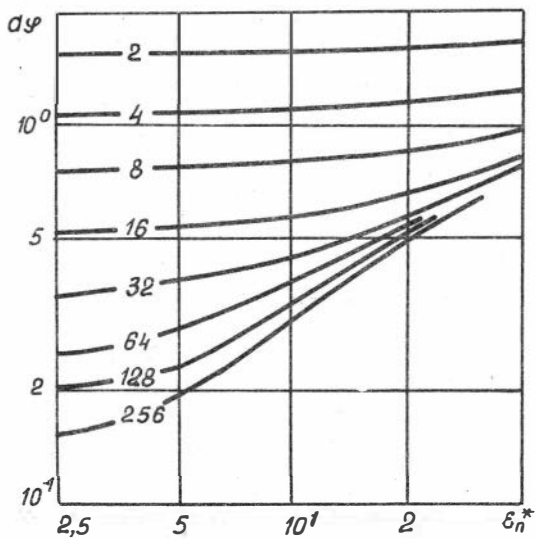


Рис.37

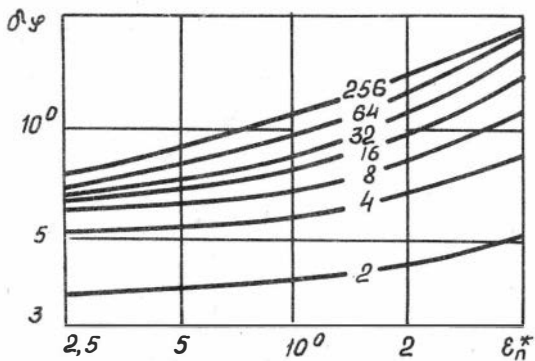


Рис.38

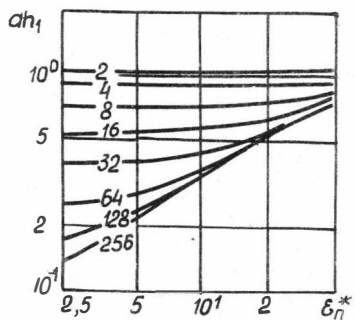


Рис. 39

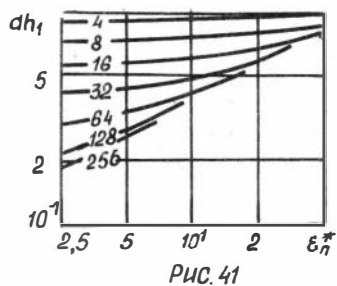


Рис. 41

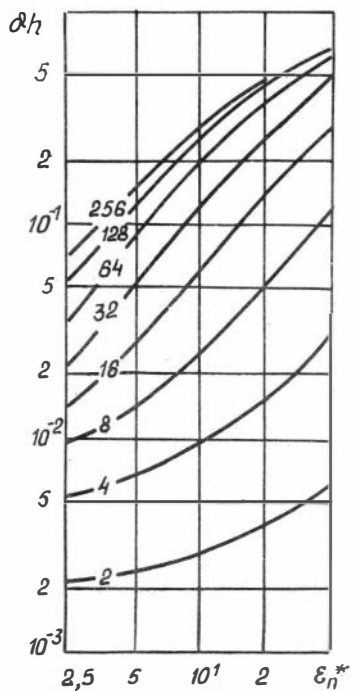


Рис. 40

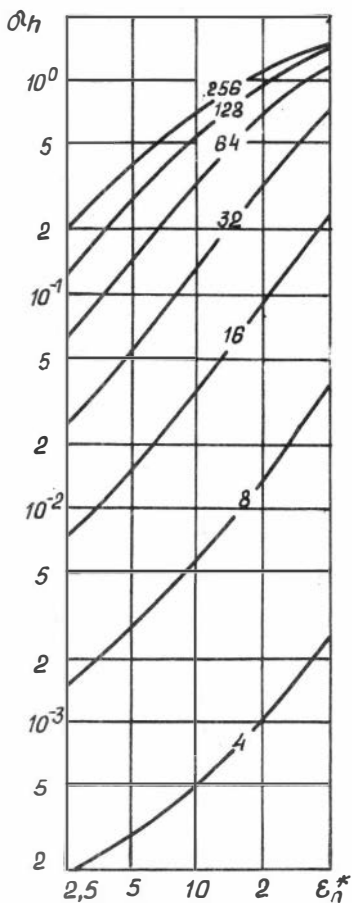


Рис. 42

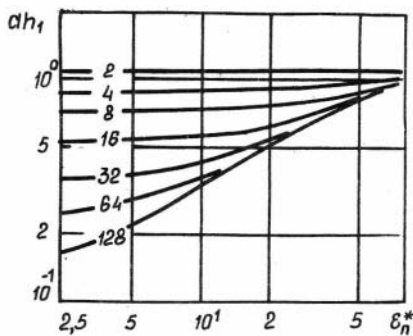


Рис. 43

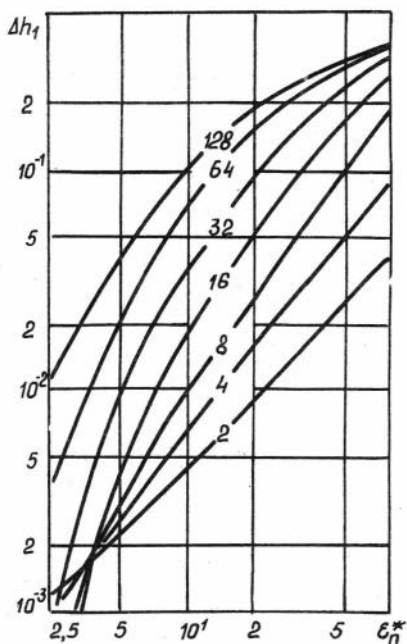


Рис. 44

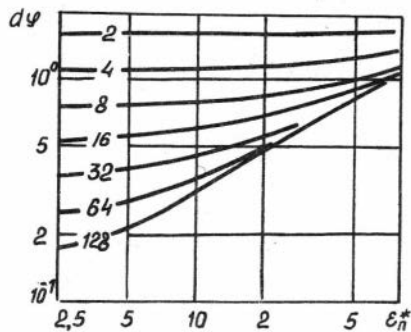


Рис. 45

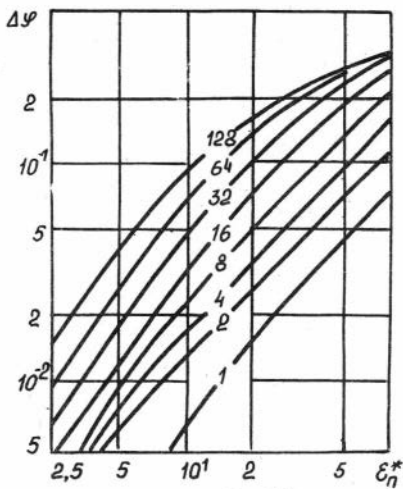
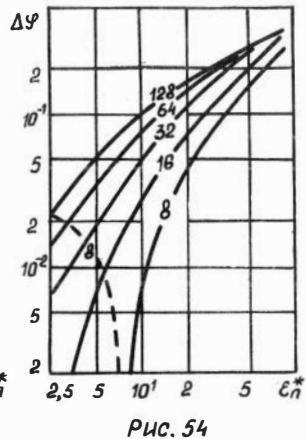
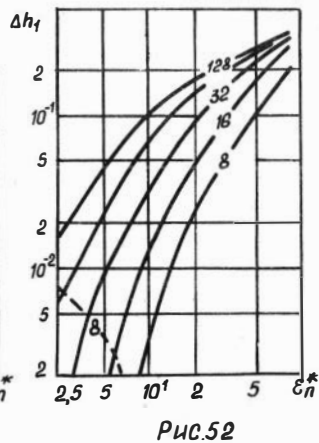
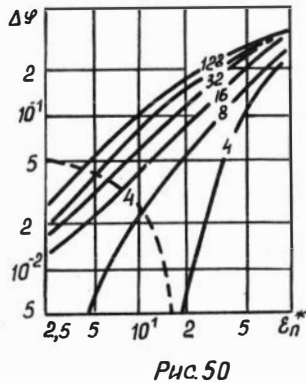
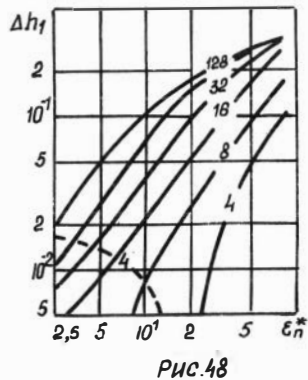
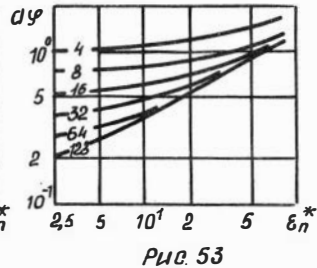
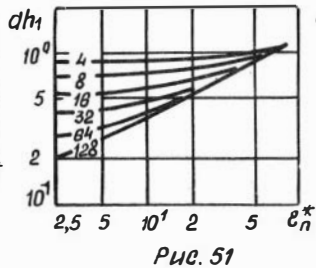
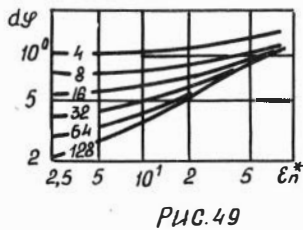
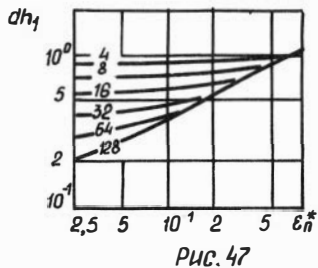


Рис. 46





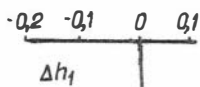


Рис. 55

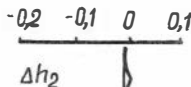


Рис. 56

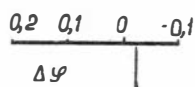


Рис. 57



Рис. 58



Рис. 59



Рис. 60

I  $\rho_{вм} = 80 \text{ м·м}; \epsilon_{вм}^* = 10$   
 $\rho_{пл} = 32 \text{ м·м}; \epsilon_{пл}^* = 20$

$\rho_{вм} = 32 \text{ м·м}; \epsilon_{вм}^* = 20$

II  $\rho_{пл} = 80 \text{ м·м}; \epsilon_{пл}^* = 10$

Рис. 61



Рис. 62



Рис. 63